



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Commande électrique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Selatni Abdellah – Rouina Bilal

Le : dimanche 26 juin 2022

Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone a Flux Rotorique Orienté

Jury :

Dr.	LAALA Wided	MCB	Université de Biskra	Encadrant
Pr.	GOLEA Ammar	Pr	Université de Biskra	Président
Pr.	SAHRAOUI Mohammed	Pr	Université de Biskra	Examineur



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Commande électrique

Réf. :

Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone a Flux Rotorique Orienté

Le : dimanche 26 juin 2022

Présenté par :

Selatni Abdellah
Rouina Bilal

Avis favorable de l'encadreur :

Dr. LAALA Wided

Signature Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents qui ont attendu ce jour avec
impatiences

Ma sœur

Mes frères

Mes amis

Tous qui me sont très chers

Toute la promotion 2021-2022



Selatni Abdellah

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

**Mes chers parents qui ont attendu ce jour avec
impatiences**

Ma sœur

Mes frères

Mes amis

Tous qui me sont très chers

Toute la promotion 2021-2022



Rouina Bilal

REMERCIEMENT

Mes remerciements vont tout premièrement à Dieu tout puissant
Pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant
toutes ces longues années.

On remercie **Mm .W. LAALA** pour nous
Avoir honorés de son encadrement et ses judicieux conseils
qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Mes remerciements vont également au
Pr. A. GOLEA et **Pr. M. SAHRAOUI** d'avoir
accepté de faire partie de mon jury de soutenance.

Nous voulons aussi remercier les membres de jury qui
Nous rendons honneur de leurs présences ainsi que pour
Toutes les remarques et conseils qui nous auront apportés.

Nous remercions vont aussi à tous les enseignants du
Département de génie électrique qui a contribué à notre
Formation.

Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous
nos amis et collègues pour le soutien tout moral.

Résumé (Français, English et Arabe)

Résumé :

La commande des systèmes électriques est la base de tous les développements techniques et les progrès réalisés en matière d'électronique de puissance et de circuits de commande ont contribué à l'utilisation des machines synchrones à rotor bobiné dans les systèmes d'entraînements électriques.

Nous utilisons les idées de contrôle vectoriel de flux de rotor ciblées pour réaliser le découplage de flux et de couple dans ce papier. La lutte vectorielle directe et la lutte vectorielle indirecte sont les deux types de commandes abordés. par des essais de robustesse. nous avons ensuite analysé les deux méthodes de commande ,et nous les avons comparés après avoir obtenu les résultats Les résultats de simulation confirment la validité et l'efficacité du système de commande.

Abstract :

The control of electrical systems is the basis of all technical developments and advances in power electronics and control circuits have contributed to the use of wound-rotor synchronous machines in electrical drive systems.

We use the focused rotor flux vector control ideas to achieve flux and torque decoupling in this paper. Direct vector control and indirect vector control are the two types of controls discussed. through robustness tests. we then analyzed the two control methods, and we compared them after obtaining the results The simulation results confirm the validity and efficiency of the control system

الملخص

يعد التحكم في الأنظمة الكهربائية أساس جميع التطورات التقنية والتطورات في إلكترونيات الطاقة ودوائر التحكم التي ساهمت في استخدام الآلات المتزامنة ذات الجرح الدوار في أنظمة التشغيل الكهربائية.

نستخدم أفكار التحكم في ناقل التدفق المركز للدوار لتحقيق فصل التدفق وعزم الدوران في هذه الورقة. التحكم المباشر في النواقل والتحكم غير المباشر في النواقل هما نوعان من الضوابط التي تمت مناقشتها. من خلال اختبارات المتانة. ثم قمنا بتحليل طريقتي الضبط وقارناهما بعد الحصول على النتائج. تؤكد نتائج المحاكاة صحة وكفاءة نظام التحكم

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

Liste des Abréviations et symboles

MCC : machine a courant continu

MAS : machine asynchrone

DTC : commande direct du couple

CVD : commande direct du couple.

CVI : commande vectoriel indirect

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tensions appliquées aux trois phases statoriques.

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Courants qui traversent les trois phases statoriques.

$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$: Flux totaux à travers ces enroulements.

V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : Tensions rotoriques

I_{ra}, I_{rb}, I_{rc} : Courants rotoriques

$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$: Flux rotoriques

R_s : Résistance d'une phase statorique.

R_r : Résistance d'une phase rotorique

$[L_s]$: Matrice des inductances statoriques.

$[L_r]$: Matrice des inductances rotoriques.

$[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelles statoriques.

$[M_{rs}]$: Matrice des inductances mutuelles rotoriques

L_s : Inductance propre d'une phase statorique.

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique.

M_{sr} : Inductance mutuelle entre phases statoriques.

M_{rs} : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

θ : Angle électrique définit la position relative instantanée entre les axes statoriques et les axes rotoriques qui sont choisis comme axes des références.

M_0 : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase Correspondent du rotor

J : Moment d'inertie des masses tournantes.

C_r : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine.

Ω_r : Vitesse rotorique.

Ω_s : Vitesse statorique.

C_e : Couple électromagnétique.

f : Coefficient de frottement visqueux.

θ : L'angle entre la phase statorique "a" et rotorique "A".

θ_s : L'angle entre la phase statorique "a" et l'axe direct "d".

θ_r : L'angle entre la phase rotorique "A" et l'axe direct "d".

ω : vitesse angulaire électrique du rotor.

ω_a : vitesse angulaire électrique du système d'axes (d, q).

X : soit une tension ou courant ou un flux.

X_0 : la composante homopolaire.

$L_s = L_s - m_s$: est l'inductance cyclique propre statorique.

$L_r = L_r - m_r$: l'inductance cyclique propre rotorique.

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$: l'inductance cyclique mutuelle entre stator et rotor.

C : L'équation mécanique :

θ_s : Déphasage entre l'axe (A) de la phase statorique et l'axe direct de Park.

θ_r : Déphasage entre l'axe (A) de la phase statorique et l'axe (a) de la phase rotorique

V_{AN}, V_{BN}, V_{CN} : Les tensions sorties de l'onduleur qui sont appliquées aux bornes de la machine

σ : Coefficient de dispersion magnétique de Blondel.

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

CHAPITRE I

Généralités sur les machines asynchrones

Figure (I.1) : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil

Figure (I.2) : Constitution de La machine asynchrone

Figure (I.3) : Constitution du rotor bobiné

Figure (I.4) : rotor à cage réel

Figure (I.5) : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée

Figure (I.6) : Vue Schématique de stator (gouche) et réelle (droite)

Figure (I.7) : schéma de rotor a cage (gouche) rotors à bobine (droite)

CHAPITRE II

MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Figure (II.1) : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée

Figure (II.2): Passage ABC-dq

Figure (II-3) : Représentation schématique de la transformation des enroulements réels en enroulements équivalents (Transformation de Park)

Figure (II.4) : Représentation des enroulements fictifs d'axes d-q

Figure (II.5) : Référentiel tournant d'axes (d– q)

Figure (II.6) : Schéma de l'onduleur triphasé en pont

Figure (II.7) : modale de machine a vide et en charge

Figure (II.8) :la courbe de tension

Figure (II.9) :la courbe de courant I_{as}

Figure (II.10) :la courbe de flux

Figure (II.11) :la courbe de vitesse

Figure (II.12) :la courbe de couple

LISTE DES FIGURES

CHAPTER III :

COMMANDE VECTORIELLE APPLIQUE A LA MAS

Figure (III.1) : Orientation du flux rotorique

Figure (III.2) : Schéma de la commande vectorielle directe

Figure (III.3) : Schéma de la commande vectorielle indirecte

Figure (III.4) : Schéma fonctionnel de la commande vectorielle

Figure (III.5) : Schéma block de Régulateur de vitesse PI

Figure (III.6) : Boucle de régulation du flux

Figure (III.7) : Boucle de régulation du courant i_{sd}

Figure (III.8) : Boucle de régulation du courant i_{sq}

Figure (III.9) : Bloc de défluxage

Figure (III.10) : la courbe de courant i_{ds} i_{qs}

Figure (III.11) : la courbe de tension V_{ds} V_{qs}

Figure (III.12) : la courbe de couple C_e

Figure (III.13) : la courbe de vitesse

Figure (III.14) : la courbe de courant i_{as} i_{bs}

Figure (III.15) : la courbe de flux ϕ_{idr} ϕ_{iqr}

Figure (III.16) : la courbe de flux

Figure (III.17) : la courbe de courant i_{as}

Figure (III.18) : la courbe de courant i_{bs}

Figure (III.19) : la courbe de vitesse

Figure (III.20) : la courbe de flux ϕ_{idr} ϕ_{iqr}

Figure (III.21) : la courbe de courant i_{ds} i_{qs}

Figure (III.22) : la courbe de couple C_e

Figure (III.23) : la courbe de tension V_{ds} V_{qs}

Figure (III.24) : Tension aux bornes de l'onduleur

Figure (III.25) : les courbe de tension V_{ds} V_{qs}

LISTE DES FIGURES

Figure (III.26) : la courbe de couple C_e

Figure (III.27) : la courbe de vitesse

Figure (III.28) : la courbe de flux ϕ_{idr} et ϕ_{iqr}

Figure (III.29) : la courbe de courant i_{ds} et i_{qs}

Figure (III.30) : la courbe de couple C_e

Figure (III.31) : la courbe de vitesse

Figure (III.32) : la courbe de flux

Figure (III.33) : la courbe de flux

Figure (III.34) : la courbe de vitesse

Figure (III.35) : la courbe de couple C_e

Figure (III.34) : la courbe de vitesse

Figure (III.35) : la courbe de couple C_e

Figure (III.36) : la courbe de vitesse

Figure (III.37) : la courbe de couple C_e

Figure (III.38) : la courbe de flux

Figure (III.39) : la courbe de couple C_e

Figure (III.40) : la courbe de courant i_{ds}

Figure (III.41) : la courbe de courant i_{qs}

Figure (III.42) : la courbe de vitesse

Figure (III.43) : la courbe de flux ϕ_a

Figure (III.44) : la courbe de flux ϕ_a

Figure (III.45) : la courbe de couple C_e

Figure (III.46) : la courbe de vitesse

SOMMAIRE

Sommaire

Dédicace

Remerciements

Résumé

Liste des Abréviations et symboles

Liste des figures

Introduction générale

CHAPITRE I

Généralités sur les machines asynchrones

I.1.Introduction :.....	(1)
I.2.Constitution :.....	(2)
I.3.Classification des machines asynchrones :.....	(3)
I.3.1. Machine asynchrone à rotor bobiné :.....	(4)
I.3.2. Machine asynchrone à rotor à cage :.....	(4)
I.4.Définition de la machine asynchrone :.....	(5)
I.5.Les Avantages et inconvénients de la machine asynchrone :.....	(6)
I.6.Présentation de la machine asynchrone:.....	(7)
I.6.1. Stator :.....	(7)
I.6.2. Rotor :.....	(8)
I.7.Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone :.....	(9)
I.8.Conclusion :.....	(10)

CHAPITRE II

MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

II.1. Introduction :.....(12)

II.2. hypothèse simplificatrices :.....(13)

II.3. Modélisation de la machine asynchrone :.....(13)

II.3.1. Équations générales de la machine asynchrone triphasée :.....(14)

 II.3.1.a.Equations électriques :.....(14)

 II.3.1.b.Equation magnétiques :.....(14)

 II.3.1.c.Equations mécanique:.....(15)

II.4. Transformation triphasé biphasé (ou de Concordia) :.....(17)

 II.4.1. Transformation de Clarke :.....(18)

 II.4.2. Transformation de Concordia :.....(19)

II.5. Transformation de Park :.....(19)

II.6. Application de la transformation de Park :.....(21)

II.7. Choix du référentiel :.....(22)

II.8. Convertisseur de fréquence :.....(23)

 II.8.1. Description et Fonctionnement de l'onduleur triphasé :....(27)

II.9. Simulation de la machine asynchrone alimentée par
 l'onduleur a vide et en charge :.....(27)

II.10. Résultats de simulation :.....(27)

II.11. Discussion des résultats :(28)

SOMMAIRE

II.12.Conclusion :.....	(29)
CHAPITER III :	
Commande Vectorielle applique à la MAS	
III.1. Introduction :.....	(30)
III.2. Principe de la commande vectorielle à flux rotorique orienté :..	(31)
III.3. Technique d'orientation du flux:.....	(32)
III.3.1.choix d'orientation du flux rotorique :.....	(32)
III.4. Type de la commande vectorielle :.....	(33)
III.4.1. Schéma de la commande vectorielle directe :.....	(33)
III.4.2. Schéma de la commande vectorielle indirecte :.....	(34)
III.5. Calcul du régulateur :.....	(35)
III.5.1. Calcul du régulateur de vitesse PI:.....	(35)
III.5.2. Calcul du régulateur du flux :.....	(35)
III.5.3. Calcul du régulateur de courants :.....	(36)
III.6. Défluxage:.....	(37)
III.7. Résultats des simulations :.....	(38)
III.7.1. Résultats de la commande vectorielle indirecte :.....	(38)
III.7.2. Résultats de la commande vectorielle directe :.....	(40)
III.8. Discussion des résultats :.....	(44)
III.9. Robustesse vis à vis des variations paramétriques :.....	(44)

SOMMAIRE

III.10. Résultats de simulation :.....	(44)
III.10.1. Résultats de la commande vectorielle directe :	(44)
III.10.2. Résultats de la commande vectorielle indirecte :	(46)
III.11. Comparaison entre la commande vectorielle directe et la commande vectoriel indirecte :.....	(47)
III.12. Conclusion :.....	(59)

Conclusion générale

PARAMETRES DE LA MACHINE ASYNCHRONE UTILISEE

Bibliographie

Introduction générale

Introduction générale :

Dans le domaine de la vitesse variable, la machine à induction assure actuellement une part très importante et toujours croissante du marché grâce à sa simplicité, sa robustesse et son faible coût de fabrication. Malgré tous ces avantages, sa commande reste une des plus complexes comparativement à celle de la machine à courant continu, car son modèle mathématique est non linéaire et fortement couplé, ce qui est à l'opposé de sa simplicité structurelle [30].

La résolution de ce problème de couplage entre le flux et le couple a donné naissance à la commande vectorielle qui cherche à orienter le flux rotorique, statorique ou d'entrefer.

L'évolution de la micro-informatique et la disponibilité de moyen de contrôle très rapide tels le DSP, permet aujourd'hui, de réaliser des algorithmes très complexes de commande pour prendre en compte la non linéarité du modèle de la machine à induction. Dans les deux dernières décennies, un essor appréciable à la commande du moteur à induction a été donnée, où l'on peut distinguer la commande vectorielle par orientation du flux, la commande directe du couple DTC, la commande non linéaire et la commande par mode glissant [30].

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous avons fait un aperçu sur la machine asynchrone (MAS), tout en précisant ces différents types associés aux différentes structures du rotor aimants.
- Le deuxième chapitre a été destinée, en première partie, à la modélisation dynamique de la machine asynchrone dans le repère biphasé. C'est là où se concentrent les équations mathématiques, électromagnétiques et mécaniques de la MAS. La deuxième partie est consacrée à l'étude de l'onduleur de tension et de sa commande
- Le troisième chapitre décrit le principe de la commande vectorielle direct et indirect de la MAS pour l'asservissement de vitesse. La simulation de cette commande a été réalisée par le logiciel Matlab / Simulink.

Enfin, nous clôturons ce travail par une conclusion

CHAPITRE I

Généralités sur les machines asynchrones

I.1.Introduction :

La machine asynchrone, de par sa construction, fait l'objet d'un intérêt accru dans le domaine de l'industrie et occupe une large plage d'applications au détriment des machines synchrones et à courant continu. Elle présente un système dynamique non linéaire. Par conséquent, sa commande nécessite la disponibilité d'un modèle représentant fidèlement son comportement au niveau de ses modes électriques, électromagnétiques et mécanique [35].

Ce chapitre présente en bref la construction de la machine asynchrone, la classification de cette dernière, et ces avantages et inconvénients.

I.2.Constitution :

La machine asynchrone fonctionne en mode génératrice ou moteur, elle aussi permet de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique ou le contraire.

La machine asynchrone, souvent appelée la machine à induction composé d'un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. La partie fixe qui s'appelle le stator; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor qui est la partie mobile, Ce dernier est monté sur un axe de rotation. On définit deux types de rotor: rotor bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, on peut dire qu'électriquement les deux types sont équivalent [26].

On propose, dans cette partie, de donner quelques précisions sur les éléments de constitutions des machines asynchrones. Cette description va nous permettre de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement [21].

Les machines asynchrones triphasées peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en deux parties distinctes Figure (I.1) :

- Le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique [21].
- Le rotor et les roulements, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge Mécanique .[41]

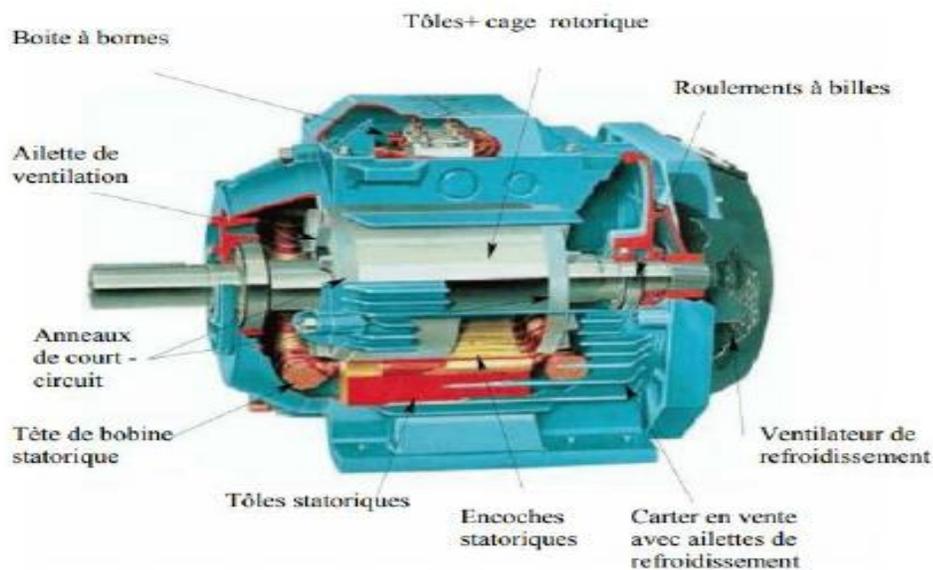


Figure (I.1) : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [40].

I.3. Classification des machines asynchrones :

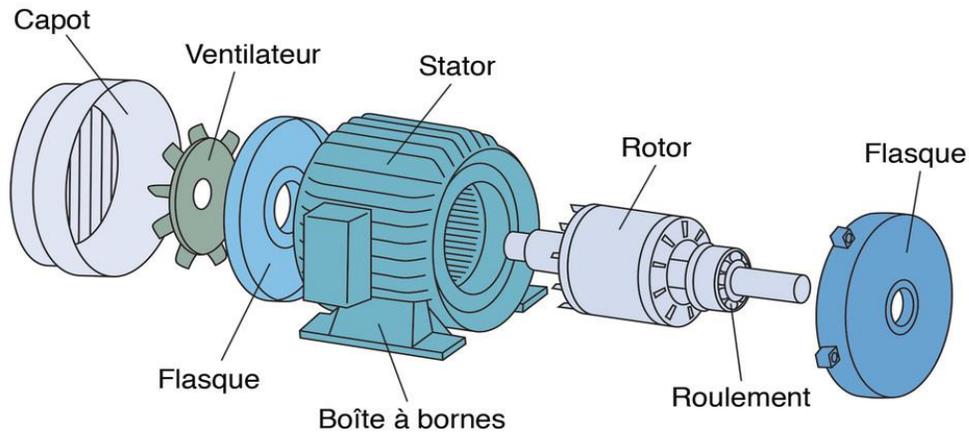


Figure (I.2) : Constitution de La machine asynchrone

D'une part, la machine asynchrone est constituée d'une partie fixe constituée d'un boîtier à l'intérieur duquel le circuit magnétique et l'enroulement du stator sont situés, et d'autre part, une pièce mobile connue sous le nom de rotor. La carcasse nervurée monobloc en fonte ou en acier avec ailettes longitudinales. [9]

En fonctionnement normal, le rotor de la machine asynchrone tourne à vitesse de Ω_r radians par seconde, et la force magnétique produit par les courants statiques tourne à Ω_s radians par seconde, bien que la vitesse soit généralement inférieure à Ω_s et on a :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (I.1)$$

ω_s : Pulsation statorique , liée à la fréquence du stator.

P: nombre de pair de pôle

Le rotor est constitué de manière à obtenir trois enroulements ayant un nombre de pôles identique à celui du stator. Les enroulements rotoriques sont en court circuit, la vitesse de rotation du rotor est inférieure à Ω_s , et on note : [11]

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (I.2)$$

g : Glissement de la vitesse de rotation

I.3.1. Machine asynchrone à rotor bobiné :

Dans le cas des moteurs à rotors bobinés, le rotor supporte un bobinage monophasé alimenté par un courant continu tandis que le stator est équipé d'un bobinage polyphasé à courant alternatifs. L'obtention d'une valeur de couple moyen non nulle ne passe alors par la vérification de la condition de synchronisme qui impose une égalité stricte entre vitesse du champ tournant stator et vitesse du champ tournant rotor.

Afin de s'en parer des contacts glissants (bague balais) comme pour les machines à courant continu, les machines synchrones à rotor bobiné font appel, le plus souvent, à une excitatrice (ou alternateur d'excitation) associée à un redresseur tournant, pour éliminer tout contact glissant. Cet alternateur auxiliaire dont l'induit est accouplé à l'arbre de la machine débite dans l'inducteur, par l'intermédiaire du pont redresseur à diodes tournant aussi avec, L'arbre de la machine [15].

Le rotor d'une machine bobiné est constitué de trois bobines (on parle aussi de rotor à bague). Chaque bobine est reliée à une bague. Les bagues permettent d'avoir une liaison électrique avec les bobines du rotor. Le rotor est mis en court-circuit par l'extérieur au travers de trois bornes liées électriquement par des contacts glissants appelés bagues réalisées en laiton sur les quelles s'appliquent des balais de graphite Figure (I.3). Les trois enroulements rotoriques sont couplés en étoile à l'intérieur de la machine [21].

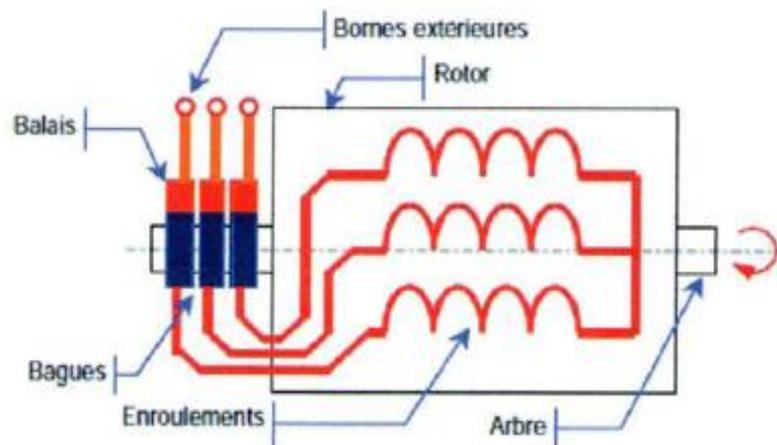


Figure (I.3) : Constitution du rotor bobiné.

I.3.2. Machine asynchrone à rotor à cage :

La grande majorité des moteurs sont à cages. Dans chaque encoche rotorique est placée une barre. Ces barres sont en cuivre pour les moteurs de forte puissance, et en alliage d'aluminium pour les machines de

faible et moyenne puissance. Elles sont réunies à chaque extrémité du rotor par des anneaux réalisant le court-circuit. L'enroulement rotorique ainsi réalisé n'est pas accessible à partir du stator [18].

Alors les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barres rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor. Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [16].



Figure (I.4) rotor à cage réel [20].

I.4. Définition de la machine asynchrone :

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif, la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales à cause du glissement. Le rotor est toujours en retard par rapport au champ statorique, la machine asynchrone est dite (machine à induction) car l'énergie est transférée du stator au rotor ou inversement par induction électromagnétique. [2].

Chaque machine avec des pôles ($2p$) et connectée à un réseau de fréquence f_s qui ne tourne pas au niveau de la vitesse synchrone ($60f_s/p$) est appelée machine asynchrone. Les moteurs asynchrones sont

des machines qui utilisent l'énergie électrique pour créer de la puissance mécanique. Nous pouvons distinguer deux types de périphériques asynchrones. [6]

- Machines utilisant l'induction (à cage d'écureuil).
- Machines à collecteur (rotor bobiné).

I.5. Les Avantages et inconvénients de la machine asynchrone :

I.5.1. Les Avantages :

- Le moteur asynchrone est le moteur électrique le plus utilisé dans l'industrie; il est peu coûteux, fabriqué en grande quantité, et il est durable, fiable et rentable.
- c'est le moteur industriel par excellence qui ne possède pas d'organes délicats comme le collecteur du moteur à courant continu et qui n'utilise pas de contacts glissants comme le moteur synchrone (pour rotor excitation) et qui fonctionne directement sur le secteur alternatif, sans transformations préalables de l'énergie électrique qui l'alimente
- Pour les unités de puissance modestes, le démarrage des moteurs asynchrones n'est pas un problème. Les moteurs de capacité significative, en revanche, doivent être démarrés à une tension inférieure pour éviter un courant élevé.
- Lorsque vous le chargez, sa vitesse varie un peu, mais elle dépasse rarement quelques centièmes de la vitesse au ralenti, il est donc facile de l'oublier .
- Les courants qui circulent dans le stator, constituent l'unique source externe du champ magnétique
- Utilisé dans la puissance moyenne et élevés.
- Les réseaux industriels de tension et de fréquence sont directement connectés à la machine asynchrone avec la respectant des termes
- Le couple de départ est beaucoup plus élevée que le couple nominaux.
- Elle tourne à vitesse variable différente de la vitesse synchrone.

I.5.2. Les inconvénients :

les inconvénients de La machine asynchrone et présente par :

- La vitesse est déterminée par le montant de la charge.
- nécessité d'un variateur de vitesse(Variation de vitesse).

I.6. Présentation de la machine asynchrone :

Une machine asynchrone triphasée a un stator fixe et un rotor mobile centré sur l'axe symétrique de la machine. Figure (I.5).

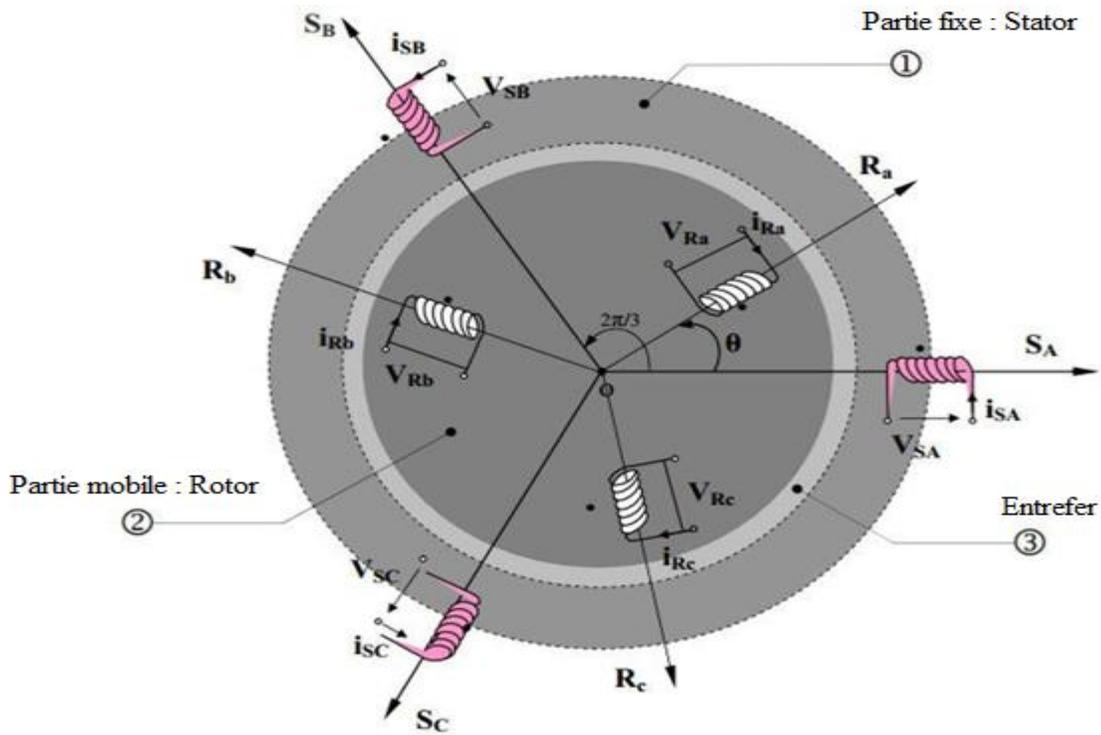


Figure (I.5) : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.

I.6.1. Stator :

Trois bobines avec un axe de 120° composent le stator. Un réseau triphasé de tensions sinusoïdales avec une fréquence et une amplitude constantes ou un onduleur de tension est utilisé pour fournir les phases. Il est constitué d'un enroulement enroulé qui est dispersé dans les fentes du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilement de feuilles avec des encoches découpées parallèlement à celles de l'axe de machine.

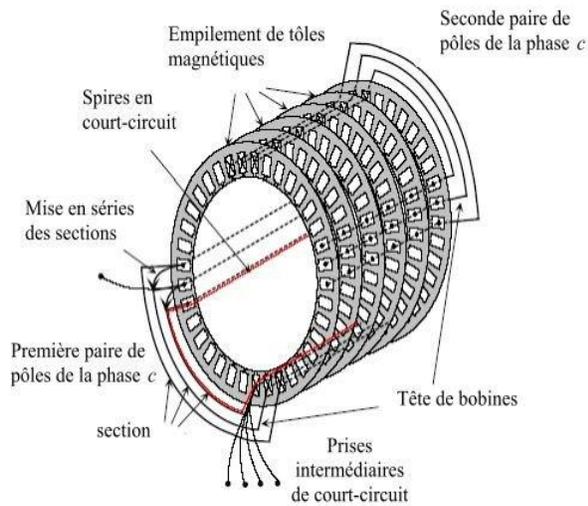


Figure (I.6) : Vue Schématique de stator (gauche) et réelle (droite) [34]

I.6.2. Rotor :

Le circuit magnétique est construit à partir de tôles d'acier qui sont généralement de la même origine que l'acier les feuilles utilisées pour la construction du stator et les rotors des machines asynchrones peuvent être de deux types : Les rotors à bobine et les rotors à cage sont les deux types de rotors. [4]

Un système d'enroulement triphasé peut être utilisé :

- 1- pour rendre la construction du rotor (rotor enroulé)
- 2- les pôles ferromagnétiques ont une cage conductrice intégrée .

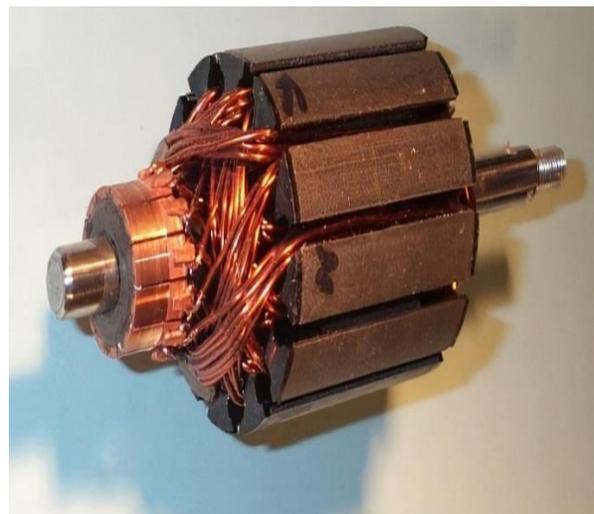


Figure (I.7) : rotor a cage (gouche) rotor à bobine (droite) [20].

I.7.Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone :

Le principe de fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur l'interaction électromagnétique du champ tournant, créée par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs du rotor sont coupés par le champ tournant [13].

Dans le stator, le courant crée un champ magnétique tournant. La fréquence du stator des courants détermine la fréquence de rotation de ce champ, c'est-à-dire sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation . La vitesse du synchronisme fait référence à la vitesse de rotation du champ de rotation .

En conséquence, les changements de flux affectent l'enroulement du rotor (du champ magnétique). Le courant de rotor sont créés par une force électromotrice induite. L'apparition d'un couple, qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de contrer le La fluctuation du flux , est due à ces courants: la loi de Lenz. En conséquence, le rotor commence à tourner pour tenter de suivre le champ du stator.

Supposons qu'un stator composé de trois bobines avec des axes décalés de 120° et alimenté par un Le réseau triphasé produit un champ magnétique tournant à la vitesse du synchronisme dans l'espace d'air du moteur :

$$\Omega_s = \frac{2\pi \cdot N}{60} = \frac{2\pi \cdot f}{p} = \frac{\omega_s}{p} \quad (I.3)$$

Les courants induits traversent un rotor court-circuité balayé par ce champ tournant ($\Omega_s > \Omega_r$). Le rotor est ainsi soumis à des forces électromagnétiques de Laplace, qui se combinent pour produire un couple moteur qui entraîne le rotor en révolution. Bien que le rotor tourne dans la même direction que le champ de rotation, sa vitesse de rotation doit être plus lente que celle du champ tournant.

Donc la vitesse relative de l'onde par rapport au stator est donnée par :

$$\Omega = \Omega_s - \Omega_r \quad (I.4)$$

I.8. Conclusion :

En raison de sa structure et de sa résilience, la machine asynchrone dispose d'un large éventail d'applications industrielles. Son utilisation comme source d'énergie mécanique est exceptionnelle. Cependant, en raison de sa complexité de contrôle, son utilisation en tant qu'entraînement à vitesse variable, tel que le courant continu, a été ajourné.

Dans ce chapitre nous présentons au début la constitution et la classification des machines asynchrones les différents type de machine asynchrone (machine asynchrone à rotor bobiné ,machine asynchrone à rotor à cage).Aussi nous avons citez certains avantages et des inconvénients de la machine asynchrone, el en trouiduir la définition et le principe de fonctionnement de la machine asynchrone .

CHAPITRE II
MODELISATION DE LA MACHINE
ASYNCHRONE

II.1. Introduction :

Le présent chapitre est destiné à la modélisation de la machine asynchrone triphasée. Tout d'abord, nous présenterons le modèle mathématique de la machine asynchrone (équations générales, équations électriques, équations magnétique et mécaniques) dans le repère triphasé. Ensuite, nous utiliserons une transformation pour abaisser l'ordre du système et le place dans un nouveau cadre de référence à deux phases. Ce modèle sera validé par simulation en utilisant le logiciel Matlab / Simulink.

II.2. hypothèse simplificatrices :

La modélisation de la machine asynchrone est établie sous les hypothèses simplificatrices suivantes [9] :

- La répartition de l'induction dans l'entrefer est sinusoïdale.
- L'entrefer est constant.
- L'entrefer d'air est d'épaisseur uniforme et l'effet de l'entaille est minime.
- La machine est alimentée par un système de tension sinusoïdal et équilibré triphasé..
- La saturation du circuit magnétique (l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables).
- Les résistances des enroulements ne varie pas avec la température et l'effet de la peau est négligé.

Parmi les conséquences majeures de ces hypothèses, on peut citer les suivantes :

- L'additivité du flux.
- La constance des inductances propres.
- La fluctuation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

II.3. Modélisation de la machine asynchrone :

Les nombreuses façons d'étudier le modèle de la machine asynchrone sont basées sur la résolution de l'électromagnétisme et équations mécaniques. Les écarts découlent des nombreuses hypothèses simplificatrices qui peuvent être faites en fonction de la gamme de fréquences et topologie (structure physique) du système examiné, c'est-à-dire en fonction des objectifs de modélisation. [5].

Considérons une machine asynchrone triphasée avec un stator et un rotor représentés schématiquement à la figure (II.1), avec phases A, B et C, al axe de rotor et les phases a,b et c, a laxe de stator respectivement. L'emplacement relatif instantané entre les axes magnétiques des phases S_A et le R_a choisi comme les axes de référence sont définis par l'angle électrique changeant en fonction du temps. [9].

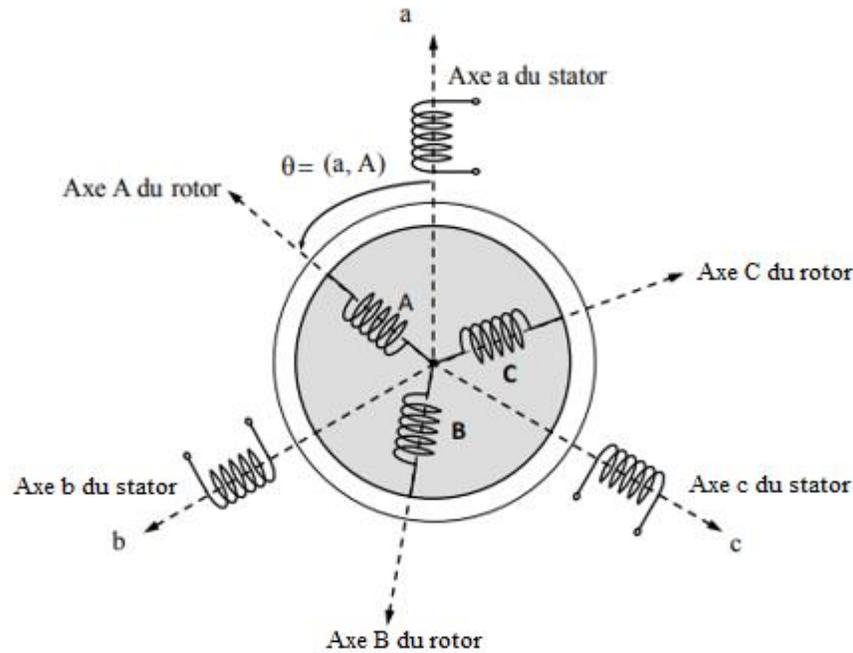


Figure (II.1) : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée

II.3.1. Équations générales de la machine asynchrone triphasée :

Pour mieux répliquer le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire d'utiliser un modèle détaillé qui est suffisamment basique pour que le temps de calcul du simulateur ne soit pas prohibitif. [3].

Si l'on considère que le moteur à induction est triphasé au niveau du stator et du rotor dans ces conditions, les trois types d'équations qui traduisent le comportement du moteur sont :

II.3.1.a. Equations électriques :

Les lois de Faraday et d'Ohm permettent de relier les tensions sur les enroulements aux flux totalisés et aux courants dans ces bobinages. [8].

En désignant par :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \phi_{sa} \\ V_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \phi_{sb} \\ V_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \phi_{sc} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d}{dt} \phi_{ra} \\ V_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d}{dt} \phi_{rb} \\ V_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d}{dt} \phi_{rc} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tensions appliquées aux trois phases statoriques.

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Courants qui traversent les trois phases statoriques.

$\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}$: Flux totaux à travers ces enroulements.

V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : Tensions rotoriques

i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} : Courants rotoriques

$\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}$: Flux rotoriques

R_s : Résistance d'une phase statorique.

R_r : Résistance d'une phase rotorique

Les équations (II.1) et (II.2) peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante :

Pour le stator :

$$[V_{s(abc)}] = [R_s][i_{s(abc)}] + \frac{D}{DT}[\phi_{s(abc)}] \quad (\text{II.3})$$

Pour le rotor :

$$[V_{r(abc)}] = [R_r][i_{r(abc)}] + \frac{D}{DT}[\phi_{r(abc)}] \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; \quad (\text{II.5})$$

II.3.1.b. Equation magnétiques :

Les flux totalisés couplés avec les phases statoriques et rotoriques s'expriment sous la forme :

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = [L_r] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + [M_{rs}]^T \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Tel que :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T \quad (\text{II.8})$$

On désigne par:

[L_s] : Matrice des inductances statoriques.

[L_r] : Matrice des inductances rotoriques.

[M_{sr}]: Matrice des inductances mutuelles statoriques.

[M_{rs}]: Matrice des inductances mutuelles rotoriques.

Où les matrices d'inductances statoriques et rotoriques sont exprimées par :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} I_s & M_s & M_s \\ M_s & I_s & M_s \\ M_s & M_s & I_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} I_r & M_r & M_r \\ M_r & I_r & M_r \\ M_r & M_r & I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

La position angulaire θ entre les axes du stator et du rotor détermine la matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor:

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T M_0 \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

L_s: Inductance propre d'une phase statorique.

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique.

M_{sr} : Inductance mutuelle entre phases statoriques.

M_{rs} : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

θ : Angle électrique définit la position relative instantanée entre les axes statoriques et les axes rotoriques qui sont choisis comme axes des références.

M_0 : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase Correspondent du rotor

II.3.1.c. Equation mécanique :

Le couple électromagnétique peut s'écrire :

$$C_e = P[i_{s(abc)}]^T \frac{d}{dt} [M_{Sr}] [i_{r(abc)}] \quad (\text{II.12})$$

Pour avoir un modèle complet de la machine, vous devez d'abord introduire l'équation de mouvement de la machine, qui est écrite comme suit :

$$J \frac{d}{dt} \Omega_r = C_e - C_r - f \Omega_r \quad (\text{II.13})$$

J : Moment d'inertie des masses tournantes.

C_r : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine.

Ω_r : Vitesse rotorique.

C_e : Couple électromagnétique.

f : Coefficient de frottement visqueux.

Les coefficients variables dans les équations ainsi obtenues augmentent la difficulté de résoudre le modèle fourni par (II.1) et (II.2). Cela conduira à l'application de la transformation du park, ce qui permettra à ces caractéristiques de être maintenus constants.

II.4. Transformation triphasé biphasé (ou de Concordia) :

Cette transformation est utilisée pour convertir un système (A,B,C) triphasé en un système biphasé (d-q) ce qui permet pour un modèle dynamique à coefficients constants. (CLARKE et CONCORDIA) sont les deux transformations les plus courantes. Le processus de transformation ,Alors que CLARKE garde

CHAPITRE II : Modélisation de la machine asynchrone

l'amplitude des grandeurs, il perd la puissance et le couple. Il conserve la puissance mais pas les amplitudes de CONCORDIA, qui est standardisé.

La figure (II.2) met en relief l'axe direct d du référentiel de Park, et l'axe en quadrature d'indice q.

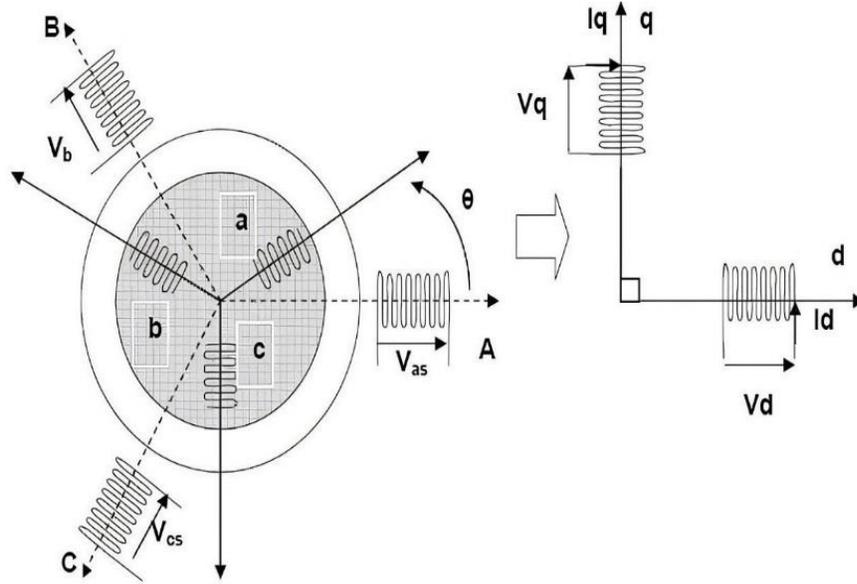


Figure (II.2):Passage ABC-dq

II.4.1. Transformation de clarke [32] :

Le passage d'un système triphasé abc à un système biphasé de CLARKE $\alpha\beta$ s'écrit :

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \xrightarrow{c_{23}} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad c_{a,d} [X_{\alpha\beta}] = c_{23} [X_{abc}] \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$$c_{23} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Le passage inverse :

$$[X_{abc}] = c_{32} [X_{\alpha\beta}] \quad \text{avec} \quad c_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

II.4.2. Transformation de Concordia [32] :

Le passage d'un système triphasé abc à un système biphasé $\alpha\beta$ s'écrit :

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \xrightarrow{T_{23}} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \text{ c.a.d. } [X_{\alpha\beta}] = T_{\alpha\beta} [X_{abc}] \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$$T_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Le passage inverse:

$$[X_{abc}] = T_{32} [X_{\alpha\beta}] \text{ avec } T_{32} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

II.5. Transformation de Park :

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux un changement de variable faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes d et q. D'après la Figure (II.3), c'est l'angle θ_s qui doit intervenir pour les grandeurs du stator et l'angle θ_r pour les grandeurs du rotor. On transforme donc l'enroulement triphasé statorique (a, b, c) et l'enroulement triphasé rotorique (A, B, C) en trois enroulements orthogonaux (d, q, o), direct, quadrature et homopolaire, respectivement [14].

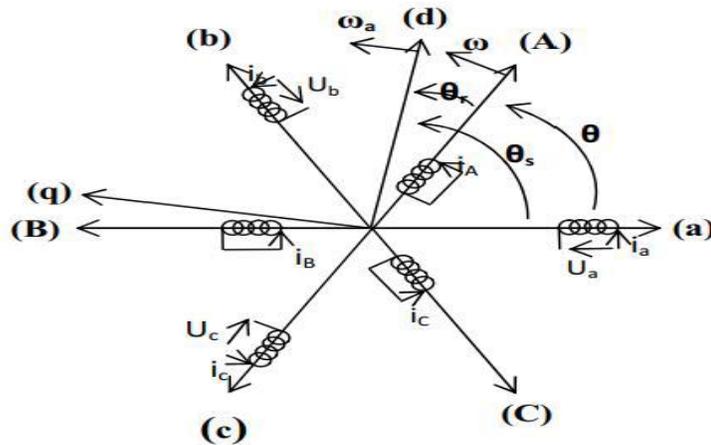


Figure (II-3) : Représentation schématique de la transformation des enroulements réels en enroulements équivalents (Transformation de Park)

CHAPITRE II : Modélisation de la machine asynchrone

θ : L'angle entre la phase statorique "a" et rotorique "A".

θ_s : L'angle entre la phase statorique "a" et l'axe direct "d".

θ_r : L'angle entre la phase rotorique "A" et l'axe direct "d".

ω : vitesse angulaire électrique du rotor.

ω_a : vitesse angulaire électrique du système d'axes (d, q).

La transformation de Park est la même pour les courants, les tensions et les flux. Elle s'écrit pour les courants par exemple:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_a & \cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_a + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta_a & -\sin(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_a + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

$\theta_a = \theta_s$ pour la transformation des grandeurs statoriques

$\theta_a = \theta_r$ pour la transformation des grandeurs rotoriques

La matrice de transformation inverse est donnée par:

$$[P]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_a & -\sin(\theta_a) & 1 \\ \cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_a + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_a + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

On peut alors exprimer les grandeurs statoriques et rotoriques comme suit :

- Les grandeurs statoriques sont obtenues pour $\theta = \theta_s$

$$\begin{bmatrix} X_{ds} \\ X_{qs} \\ X_{0r} \end{bmatrix} = P(\theta_r) \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

- Les grandeurs rotoriques sont obtenues pour $\theta = \theta_r$

$$\begin{bmatrix} X_{dr} \\ X_{qr} \\ X_{or} \end{bmatrix} = P(\theta_r) \begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Où :

X : soit une tension ou courant ou un flux.

X_0 : la composante homopolaire.

II.6. Application de la transformation de Park :

La transformation de la machine triphasé à une machine biphasé consiste à remplacer tout enroulement triphasé (a, b, c) par deux enroulements équivalents, l'un sur l'axe direct (d) et l'autre sur l'axe en quadrature (q).

La transformation de Park consiste à être appliquer aux courants, tensions et flux.

La transformation qui traduit ce passage du système triphasé (a, b, c) au système biphasé (d, q) est dite de Park, conformément à la Figure(II.4) [19].

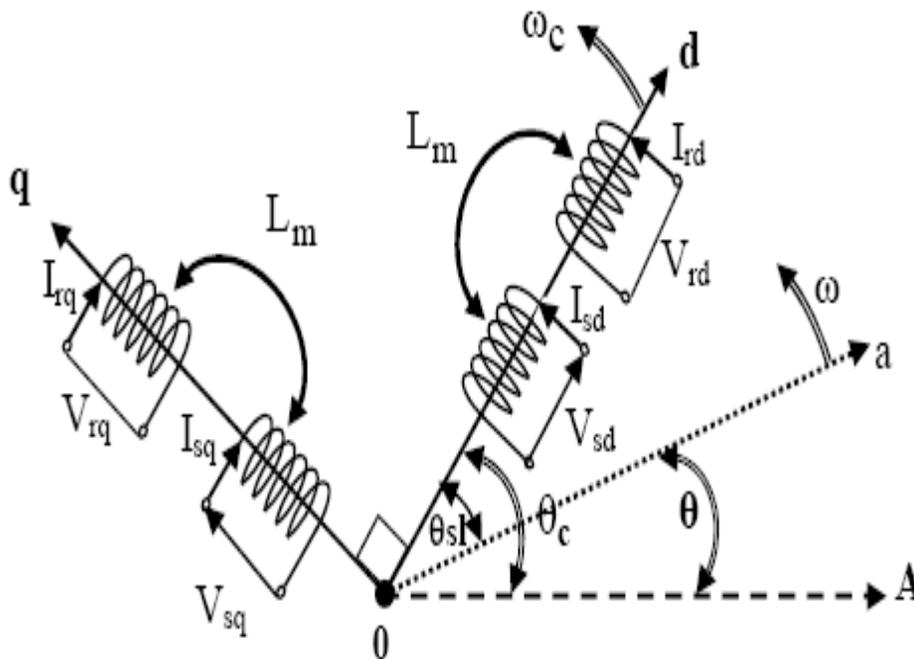


Figure (II.4) : Représentation des enroulements fictifs d'axes d-q

CHAPITRE II : Modélisation de la machine asynchrone

Les expressions de la machine (II-1 et II-2) peuvent s'exprimer en utilisant la matrice de passage est cela en considérant que le système est équilibré :

A. Les équations électriques :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_a \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_a \Phi_{ds} \\ V_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_a - \omega_r) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_a - \omega_r) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

B. Les équations magnétiques :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Avec :

$L_s = l_s - m_s$: est l'inductance cyclique propre statorique.

$L_r = l_r - m_r$: l'inductance cyclique propre rotorique.

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$: l'inductance cyclique mutuelle entre stator et rotor.

C. L'équation mécanique :

L'application de la transformation de Park pour l'équation mécanique donne :

$$C_{em} = P(\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II.27})$$

L'équation du mouvement de la machine s'écrit alors :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega \quad (\text{II.28})$$

II.7. Choix du référentiel :

L'étude analytique d'une machine asynchrone à l'aide de la transformation de Park nécessite l'utilisation d'un référentiel qui permet de réduire le nombre de grandeurs qu'on a besoin de connaître pour pouvoir simuler le fonctionnement de la machine .Il existe trois choix important ; on peut fixer le repère d, q au stator, au rotor ou au champ tournant [22].

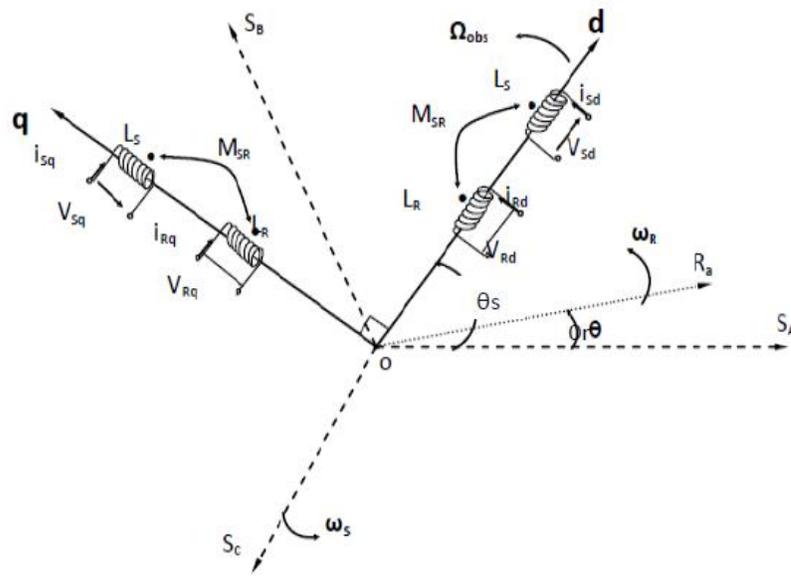


Figure (II.5) : Référentiel tournant d'axes (d– q).

θ_s : Déphasage entre l'axe (A) de la phase statorique et l'axe direct de Park.

θ_r : Déphasage entre l'axe (A) de la phase statorique et l'axe (a) de la phase rotorique

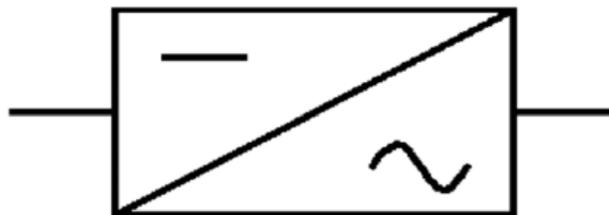
II.8. Convertisseur de fréquence :

II.8.1. Description et Fonctionnement de l'onduleur triphasé :

II.8.1.1. Description de l'onduleur :

Les onduleurs sont des convertisseurs statique assurant la conversion continu-alternatif. Par une séquence adéquate de commande des semi-conducteurs de puissance (interrupteurs électroniques), il est possible à la sortie d'un convertisseur statique une tension alternative (ou courant alternatif) de valeur moyenne nulle ; la tension peut comporter une ou plusieurs créneaux par alternance. [23]

Ce sont des onduleurs autonomes depuis la construction, la maintenance et l'ouverture des connexions entre l'entrée et la sortie dépendent uniquement du contrôle des semi-conducteurs, car la forme d'onde de tension alternative est imposée avec sa propre fréquence. fourni au récepteur



II.8.1.1.2. Types d'onduleurs :

A. Les Onduleurs de courant :

Alimentés par une source de courant continu. La nature de la source continue impose celle de la charge alternative. L'évolution rapide des techniques de fabrication des dispositifs à semi conducteurs et l'orientation des concepteurs vers la technologie des composants hybrides tels que l'IGBT ont permis de développer de nouvelles structures d'onduleurs multi niveaux.[23]

Ils sont mieux adaptés aux applications de grandes puissances parce qu'ils réduisent les contraintes dues aux phénomènes de commutation sollicitant les interrupteurs pour des applications de forte puissance et haute tension. La technologie de conversion de l'énergie continu-alternatif en utilisant les convertisseurs statiques est une partie de l'électronique de puissance en pleine croissance ; cela tient essentiellement à deux raisons :

- La première est l'étendue du domaine de leurs applications :Systèmes d'entraînements à vitesse variable, utilité d'interconnexion, alimentation de sécurité...etc.
- La seconde vient de l'amélioration des performances des semi-conducteurs de puissance et de l'apparition de nouvelles composantes (modulation de largeur d'impulsion, modulation vectorielle).

B. les Onduleurs de tension :

Contrairement à l'onduleur de courant qui lui d'onde de courant, onduleur de tension impose l'onde de tension à la machine.[23]

-un onduleur ne peut que distribuer convenablement aux trois phases des moteurs, le courant qu'il reçoit sauf :

-si la source continue est une source de tension, l'onduleur est appelé onduleur de tension.

En fonction de leurs application ces onduleurs sont classés en trois catégories :

- les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée.
- les onduleurs à fréquence variable à commutation forcée.
- les onduleurs d'entretien du circuit oscillant.

Notre étude, se limitera à utiliser l'onduleur de tension à fréquence variable à commutation forcée, dont l'avantage est de pouvoir alimenter n'importe quel type de machine à courant alternatif, tout en facilitant d'inverser l'ordre de succession des phases.

Sur ce, on distingue trois types d'onduleurs de tension :

- onduleur à conduction 120°
- onduleur à conduction 180°
- onduleur à modulation de largeur d'impulsion(MLI).
- commande en MLI avec injection d'harmonique
- technique d'élimination d'harmonique.

II.8.2.Fonctionnement de l'onduleur :

Les onduleurs de tension peuvent être trouvés dans une variété d'applications pour l'électronique de puissance, y compris la variation de vitesse de l'alternance des machines.

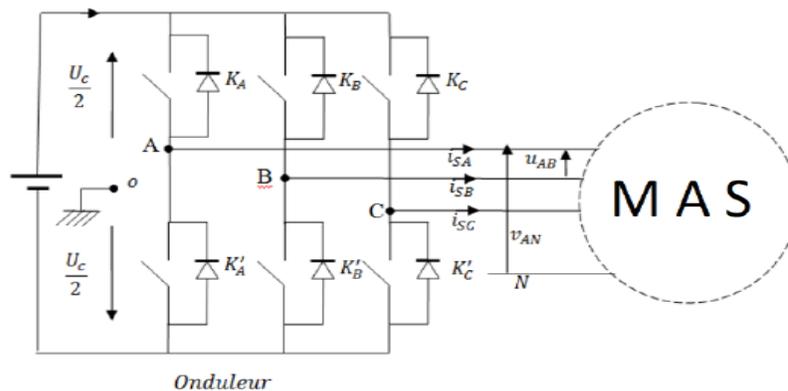


Figure (II.6) : Schéma de l'onduleur triphasé en pont [2]

L'onduleur est constitué comme le montre la figure (II.6) de trois bras dont chaque bras est composé de deux composants à semi-conducteurs reliés en série. Ces composants peuvent être des transistors IGBT ou des thyristors GTO. Chaque composant est mis en parallèle avec une diode qui permet d'écouler l'énergie emmagasinée dans la machine au moment de l'arrêt ou pendant le freinage et c'est ainsi qu'elle le protège. Pour assurer la continuité des courants alternatif i_{SA}, i_{SB}, i_{SC} les interrupteurs K_A et K'_A , K_B et K'_B , K_C et K'_C doivent être contrôlés de manière complémentaire. Les sorties de l'onduleur V_{A0}, V_{B0}, V_{C0} , sont, par commodité, référencés par rapport à un point milieu d'un pont diviseur fictif d'entrée 0. Pour qu'elles soient identiques à $1/3$ période près, il faut commander chaque interrupteur d'un demi-pont avec un retard de $1/3$ période sur le précédent [24].

La structure de l'onduleur comme le montre la figure (II.6) est constituée de six interrupteurs et elle alimentée par une source continue U_c . Les trois points milieux de chaque bras A, B, C, alimentent la machine.

CHAPITRE II : Modélisation de la machine asynchrone

On désigne par :

$V_{AN}V_{BN}V_{CN}$: Les tensions sorties de l'onduleur qui sont appliquées aux bornes de la machine

Introduisons le potentiel fictif telles que :

$$\begin{cases} V_{AN} = V_{A0} + V_{0N} \\ V_{BN} = V_{B0} + V_{0N} \\ V_{CN} = V_{C0} + V_{0N} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Compte tenu de $V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} = 0$ à cause de l'équilibre des phases, on tire de (II.30) :

$$V_{0N} = -\frac{1}{3}(V_{A0} + V_{B0} + V_{C0}) \quad (\text{II.30})$$

L'injection de (II.30) dans (II.29) permet de donner en matriciel le transfert continu-alternatif modélisant ainsi l'onduleur .

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A0} \\ V_{B0} \\ V_{C0} \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Comme V_{A0} , V_{B0} et V_{C0} ne pouvant prendre que $+Uc/2$ et $-Uc/2$ une variable binaire S_k est considérée ou $k = A, B, C$ tels que:

$S_k = 0$ Si l'interrupteur k est ouvert alors $V_{k0} = -Uc/2$

$S_k = 1$ Si l'interrupteur k est fermé alors $V_{k0} = +Uc/2$

Le transfert positif ou négatif de V_{k0} est donné sur la base que si les deux interrupteurs d'un même bras sont complémentaires.

D'une manière compacte

$$V_{k0} = S_k U_c - \frac{U_c}{2}, S_k = \{0 \ 1\} \quad (\text{II.32})$$

En remplaçant (II.32) dans (II.31), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = U_c \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

CHAPITRE II : Modélisation de la machine asynchrone

II.9. Simulation de la machine asynchrone alimentée par l'onduleur a vide et en charge :

La simulation de ce modèle nous a permis regarder les caractéristiques, du couple électromagnétique, de la vitesse de rotation, la flux et le courants statoriques.

Dans le but de voir la dynamique du modèle, nous avons inséré un couple résistant (C_r) de 0 N.m à l'instant $t=0s$ et Puis nous avons élevé le couple résistant (C_r) à l'instant $t=1s.$ au 10 N.m

La figure (II.7) présente le schéma bloc de simulation sous « MATLAB/ SIMULINK » de la machine asynchrone (MAS), alimentée directement par le réseau triphasé

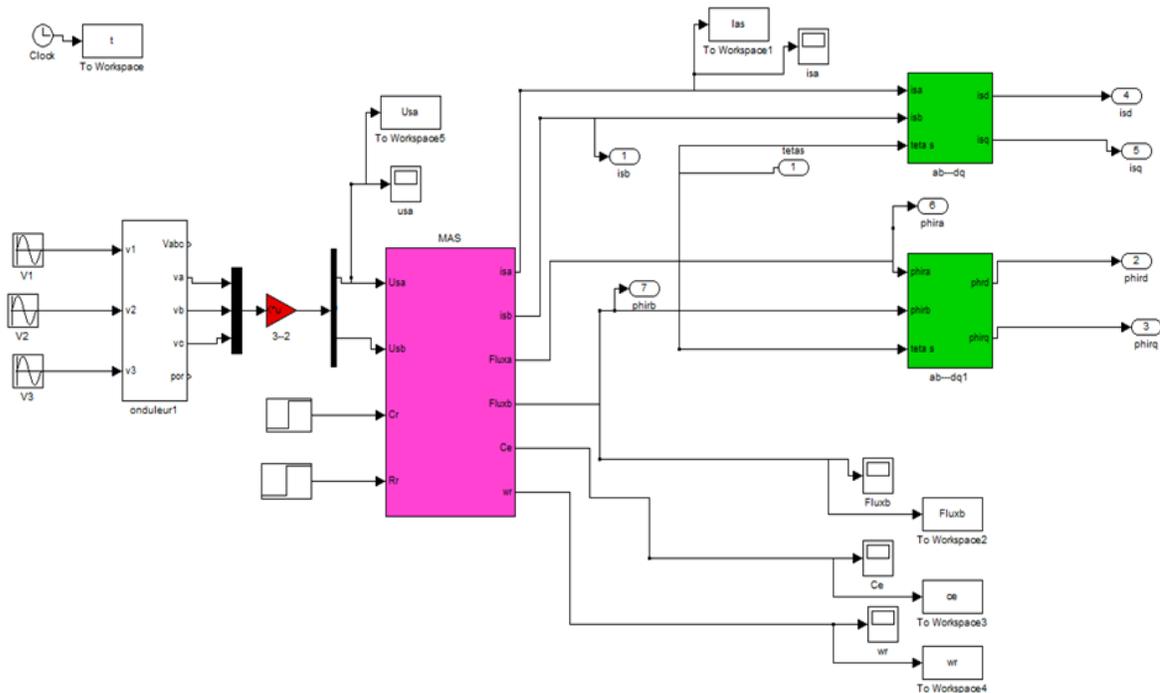


Figure (II.7) : modale de machine a vide et en charge

II.10. Résultats de simulation :

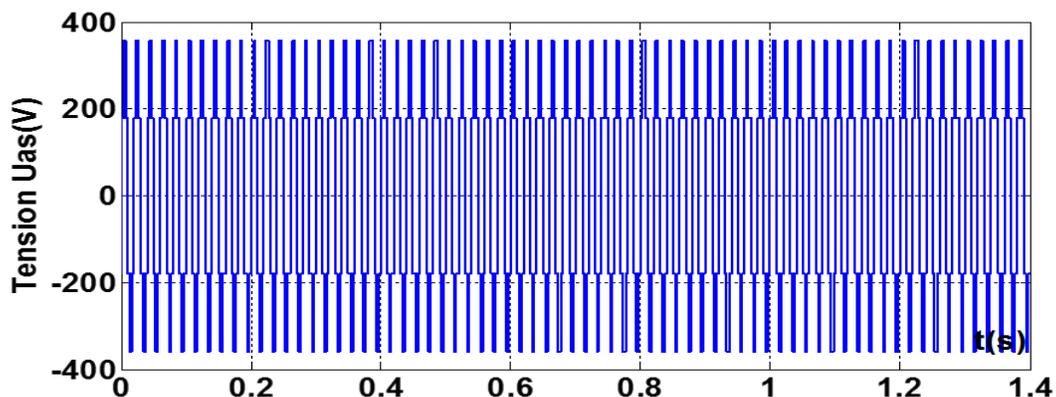


Figure (II.8) :la courbe de tension

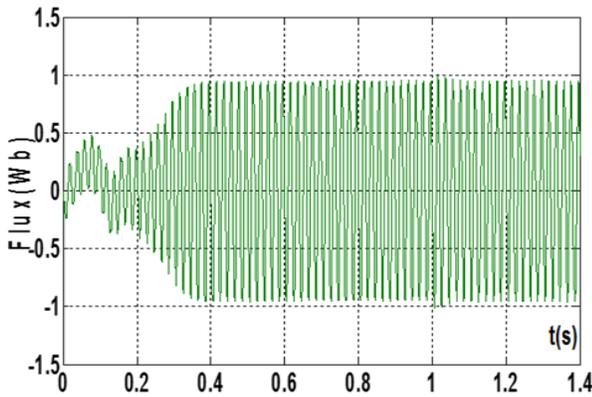


Figure (II.9) : la courbe de flux

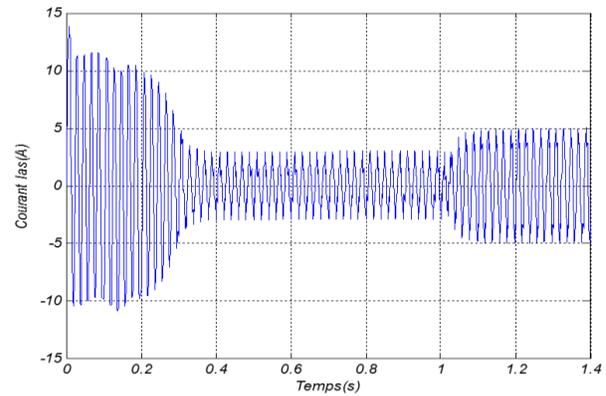


Figure (II.10) : la courbe de courant I_{as}

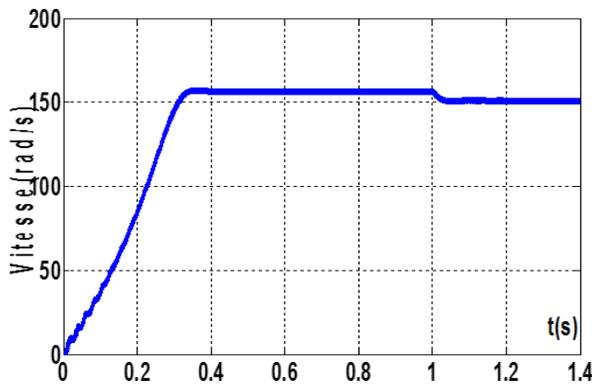


Figure (II.11) : la courbe de vitesse

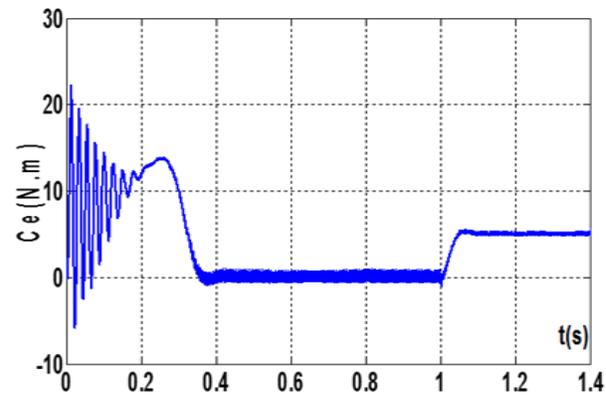


Figure (II.12) : la courbe de couple C_e

II.11. Discussion des résultats :

- Lors d'un démarrage à vide de la machine, l'allure de la vitesse est presque linéaire, elle atteint une valeur proche de la vitesse nominale au bout de ($t=0.3s$). L'application du couple de charge ($10N.m$) à l'instant $t=1s$ a fait baisser un peu la valeur de la vitesse.
- La valeur du couple électromagnétique (C_e) présente aux premiers instants de démarrage des pulsations très importantes dues au régime transitoire. Il est alors fixé à la valeur « 0 » parce que la machine est a vide, à l'instant $t=1s$ la machine est en charge on remarque que le couple est supérieur à la valeur nulle il s'ajuste parfaitement avec le couple résistant appliqué. dès que le couple atteint son régime permanent
- Sur l'allure du courant statorique, on remarque un appel de courants dès l'application du couple résistant.
- Notez la tension sinusoïdale à peu près constante (en charge au bien a vide) et c'est de retour a la source sinusoidal

II.12. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation du système machine asynchrone –onduleur. Cette modélisation est basée sur un ensemble des hypothèses simplificatrices dans le but est de simplifier le système et faciliter l'étude. Ce modèle a été validé par simulation en utilisant le logiciel Matlab / Simulink.

CHAPTER III
COMMANDE VECTORIELLE
APPLIQUE A LA MAS

III.1. Introduction :

Le domaine de l'entraînement électrique à vitesse et position variables a connu un essor ces dernières années, grâce aux progrès techniques actuels de l'électronique de puissance .substantiel. Les machines asynchrones , utilisées en régulation de vitesse dans les applications industrielles , connaissent un développement rapide au détriment des moteurs à courant continu , moins performants en couple et , surtout , nettement plus coûteux en construction et en maintenance .

La commande vectorielle ou la commande par orientation de flux rotorique (en anglais : Field Oriented Control ; FOC), proposée par Blaschke en 1972, est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines asynchrones [36].

Le but de ce chapitre est de présenter les orientations du flux dans une machine asynchrone triphasée par la commande vectoriel directe (CVD) et indirecte (CVI). Dons ce chapitre nous ont la commande vectorielle a la machine synchrone. La validation de cette commande a été réalisé par l'utilisation de logiciel Matlab/Simulink

III.2. Principe de la commande vectorielle à flux rotorique orienté :

Dans les secteurs utilisant la motorisation électrique, le moteur à induction occupe une place importante. En effet, il présente plusieurs avantages par rapport au moteur à courant continu (MCC), entre autres une maintenance minimale, une bonne robustesse, un prix d'achat relativement intéressant.

Cependant, la MCC présente une commande simple en offrant de bonnes réponses dynamiques. Ce résultat est dû au fait que les circuits induit et inducteur sont physiquement séparés et les f.m.m. des deux armatures sont constamment orthogonales. Le courant d'induit peut être contrôlé indépendamment du courant d'inducteur. Cela permet un découplage du couple et du flux, ce qui n'est pas le cas de la machine à induction.

Pour remédier à ce problème Blaschke proposa au début des années 70 la solution rendant possible ce découplage par la commande vectorielle à flux orienté (CV-OFR). Celle-ci est une loi de commande conduisant à une caractéristique du couple similaire à celle d'une MCC à excitation séparée. Avec cette technique de commande de flux, on améliore les performances du moteur asynchrone. En effet, on obtient un couple plus grand que le couple nominal au démarrage du moteur.

La technique de la commande vectorielle permet de transformer le MAS en une structure semblable à celle de la machine à courant continu à excitation séparée dans laquelle le flux n'est pas affecté par les variations du couple électromagnétique. En effet, en absence de la saturation et de la réaction de l'induit, le flux principal de l'inducteur est proportionnel au courant d'excitation. On aura ainsi un couple électromagnétique proportionnel au courant de l'induit pour une valeur constante de flux. Ce contrôle permet une amélioration du temps de réponse et un réglage rapide du couple. Mais, cette amélioration est accompagnée par une complexité plus grande de la commande et la mise en œuvre de structures d'observation ou de mesure des grandeurs de la machine, exigée par la commande. De plus, la sensibilité aux variations des paramètres internes de la machine présente l'inconvénient majeur de la commande vectorielle.

En général, deux types de commandes vectorielles sont utilisés: commande vectorielle directe (CVD) et commande vectorielle indirecte (CVI) qui font l'objet du présent chapitre.

CHAPITRE III : Commande vectorielle appliqué à la MAS

Dans une machine à courant continu, le rotor est enveloppé de telle sorte que l'axe du fmm de l'induit forme un angle de 90° avec l'axe du flux inducteur, quelle que soit la vitesse de rotation, et le couple est proportionnel au produit du flux inducteur et le courant d'induit :

$$C_e = P(K \cdot \Phi_f \cdot I_a) \quad (\text{III.1})$$

Dans une machine synchrone autopilotée, par contre l'expression du couple montre que pour le contrôler, il faut contrôler les courants i_{ds} et i_{qs} :

$$C_e = P(\Phi_{dr}i_{ds} - \Phi_{qr}i_{qs}) \quad (\text{III.2})$$

- I_{ds} exécute la fonction du courant d'excitation qui génère et contrôle le flux d'excitation Φ_r .
- I_{qs} exécute la fonction du courant induit qui, à flux d'excitation donné, contrôle le couple.

III.3. Technique d'orientation du flux :

La méthode du flux orienté consiste à choisir un système d'axes, repère tournant biphasé orienté sur Φ_r (flux rotorique), Φ_s (flux statorique) ou Φ_m (flux d'entrefer) et un type de commande qui permettent de découpler le couple et le flux. Orientation du flux rotorique sa conditions :

III.3.1. choix d'orientation du flux rotorique :

La commande vectorielle à orientation du flux rotorique est la plus utilisée car elle élimine l'influence des réactances de fuite rotorique et statorique et donnent de meilleurs résultats que les méthodes basées sur l'orientation du flux statorique ou d'entrefer, de point de vue implémentation Figure (III.1) [42].

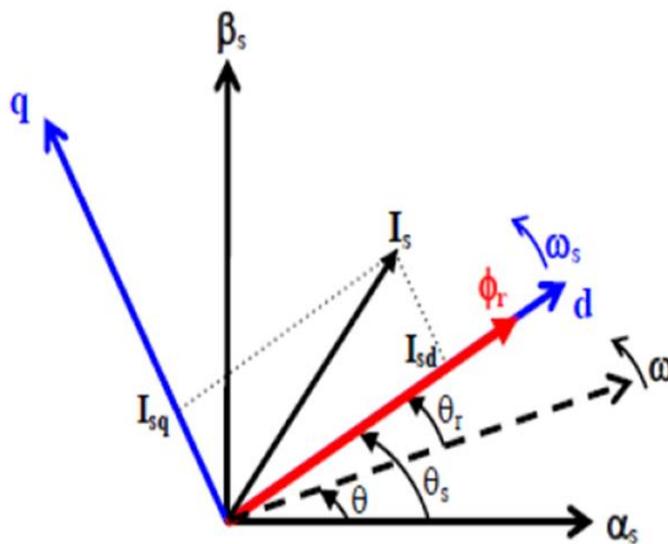


Figure (III.1) : Orientation du flux rotorique [39]

III.4. Type de la commande vectorielle :

Pour réaliser le découplage du flux et du couple, nous utilisons les concepts de contrôle vectoriel du flux du rotor orienté. Il y aura deux sortes de commandes : la commande vectorielle directe et la commande vectorielle indirecte.

La technique d'obtention de l'angle θ_s est différente selon qu'on utilise la CVD ou la CVI .

En effet, dans le contrôle direct, l'angle θ_s est calculé directement à l'aide des grandeurs mesurées ou estimées. Alors que dans le contrôle indirect, l'angle θ_s est calculé à partir de la "pulsation statorique", elle-même reconstituée à l'aide de la vitesse de la machine Ω et de la pulsation rotorique ω_r .

III.4.1.A. Schéma de la commande vectorielle indirecte :

En utilisant cette méthode, le couple électromagnétique de référence C_e^* et, par la suite, le courant i_{qs} sont déterminés par un régulateur PI, qui contrôle la vitesse. La vitesse de glissement W_s et les ID de courant continu

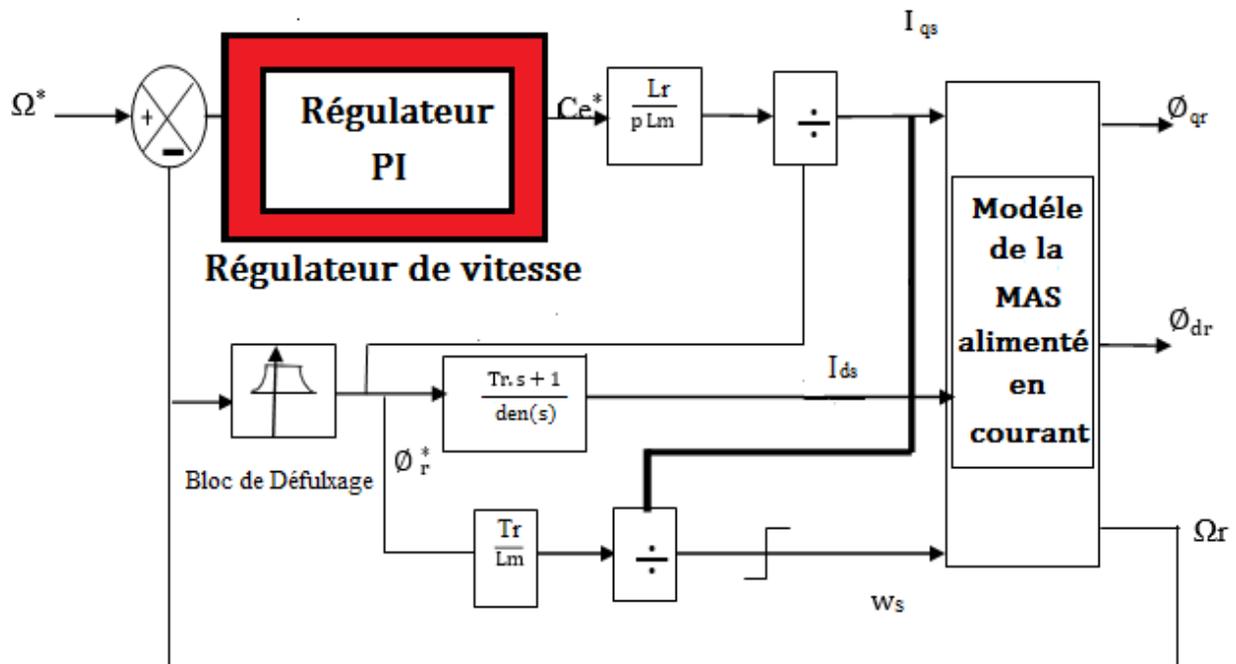


Figure (III.2) : Schéma Block de la commande vectorielle indirecte

Φ_r^* : Flux de référence

Ω^* : Vitesse de référence

Le bloc de défluxage permet de désaimanter la machine, une fois la vitesse de référence dépasse la vitesse nominale.

III.4.2.A. Schéma de la commande vectorielle directe :

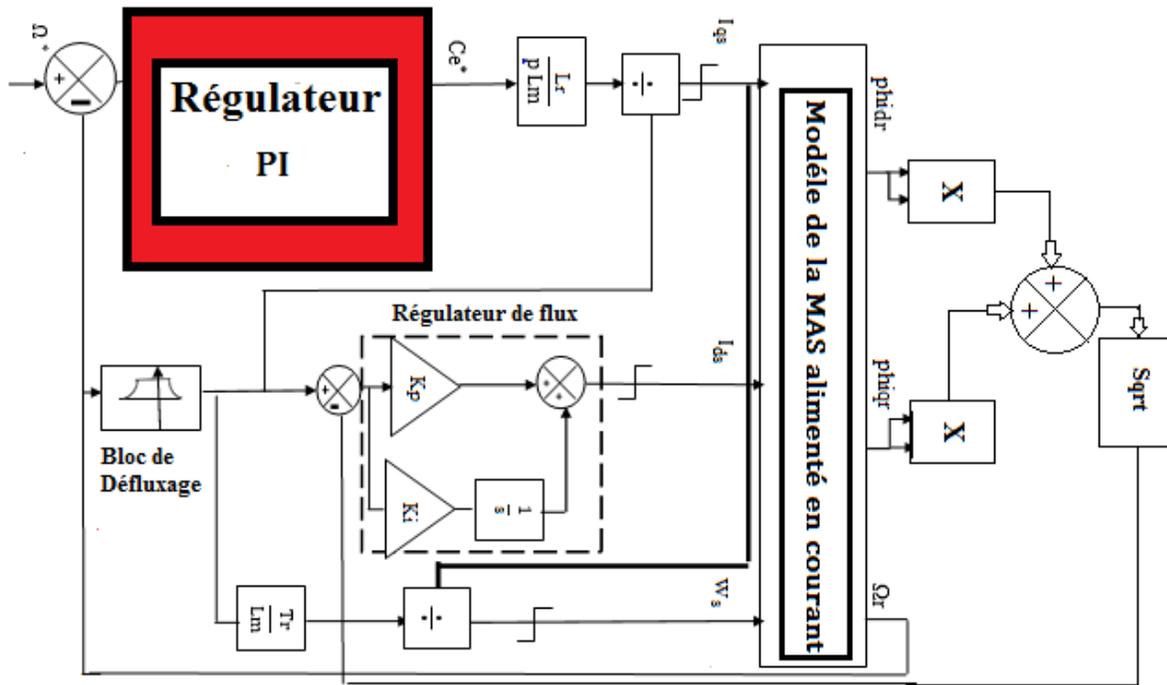


Figure (III.3) : Schéma Block de la commande vectorielle directe

C_e^* : couple électromagnétique référence

Ω^* : Vitesse de référence

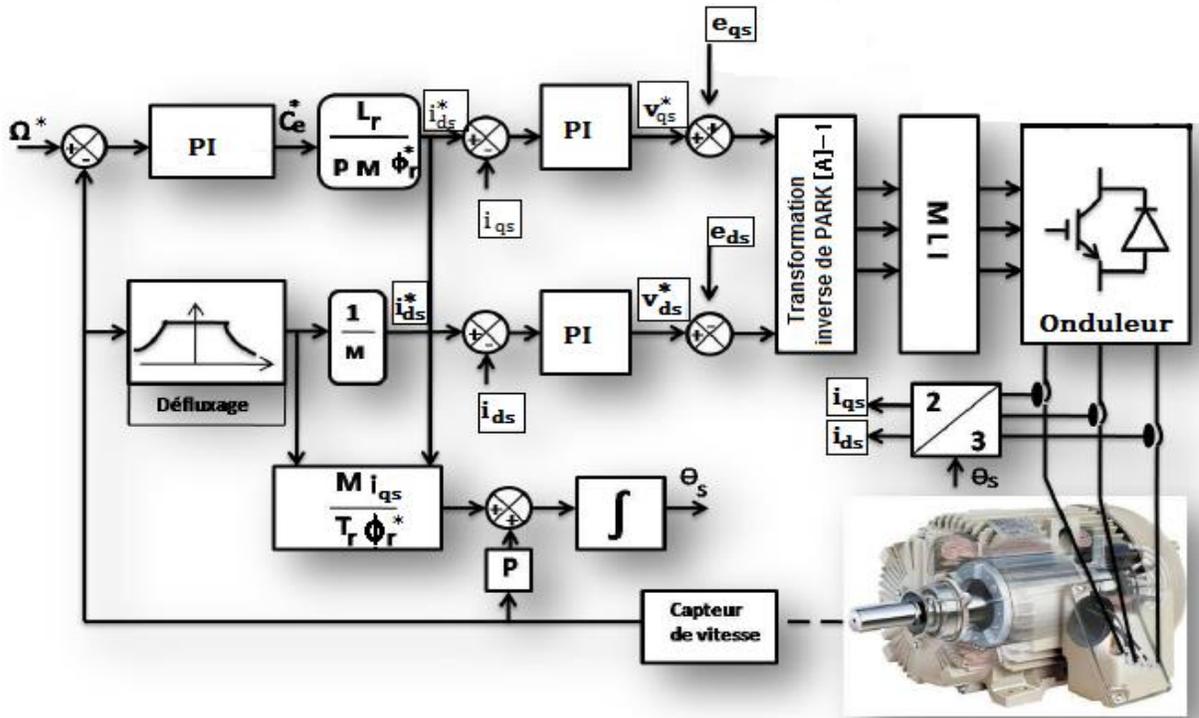


Figure (III.4) : Schéma fonctionnel de la commande vectorielle indirecte

III.5. Calcul du régulateur :

La chaîne de régulation de vitesse peut-être représenté par les schéma fonctionnel suivant

III.5.1. Calcul du régulateur de vitesse PI :

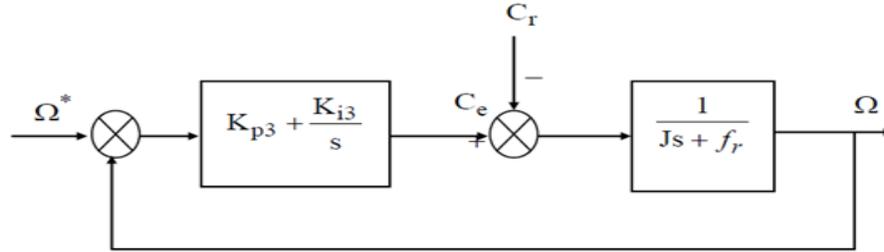


Figure (III.5) : Schéma Bloc de régulateur de vitesse PI

$$C(s) = K_{p3} + \frac{K_{i3}}{s} \quad (III.3)$$

$$\frac{\Omega}{\Omega^*} = \frac{K_{p3}s + K_{i3}}{s(Js + f)} \quad (III.4)$$

En boucle fermée,

$$\frac{\Omega}{\Omega^*} = \frac{\frac{K_{p3}}{K_{i3}}s + 1}{\frac{J}{K_{i3}}s^2 + \left(\frac{K_{p3} + 1}{K_{i3}}\right)s + 1} \quad (III.5)$$

la forme canonique de l'équation (III.5) :

$$H(s) = \frac{1}{\frac{1}{\omega^2}s^2 + \left(\frac{2\varepsilon}{\omega}\right)s + 1} \quad (III.6)$$

On obtient :

$$\begin{cases} K_{i3} = J\omega^2 \\ K_{p3} = \frac{2\varepsilon K_{i3}}{\omega} - f \end{cases} \quad (III.7)$$

III.5.2. Calcul du régulateur du flux :

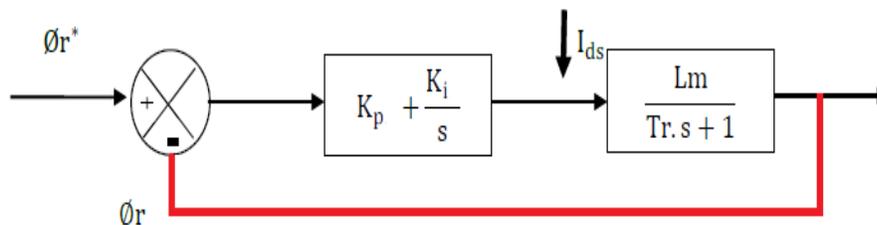


Figure (III.6) : Boucle de régulation du flux

La fonction de transfert en B.F :

$$\frac{\phi_r}{\phi_r^*} = \frac{(k_p + \frac{k_i}{s}) \left(\frac{L_m}{Tr.s + 1}\right)}{1 + (k_p + \frac{k_i}{s}) \left(\frac{L_m}{Tr.s + 1}\right)} \quad (III.8)$$

l'équation caractéristique :

$$S^2 + \frac{(k_p s L_m + 1)}{T_r} S + \frac{k_i L_m}{T_r} = 0 \quad (\text{III.9})$$

l'équation caractéristique est calculée :

$$S^2 + 2\beta s + \beta^2 = 0 \quad (\text{III.10})$$

Par la comparaison des équations (III.11) et (III.12), les gains du régulateur sont obtenus ainsi :

$$K_i = \frac{T_r \beta^2}{L_m} \quad (\text{III.11})$$

$$K_p = \frac{2\beta T_r - 1}{L_m} \quad (\text{III.12})$$

III.5.3. Calcul du régulateur de courants :

- régulateur i_{ds} :

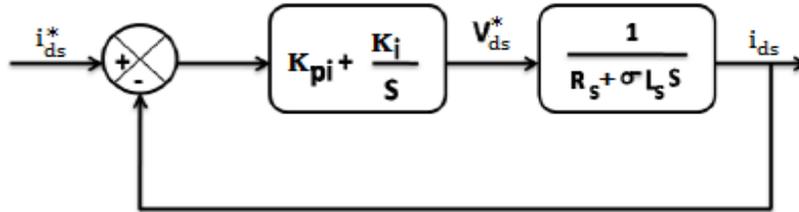


Figure (III.7) :Boucle de régulation du courant i_{ds}

La fonction de transfert du régulateur PI est donnée par :

$$C(s) = K_{pi} + \frac{K_i}{s} \quad (\text{III.13})$$

La fonction de transfert du régulateur en boucle ouverte du système est :

$$\frac{i_{ds}}{i^*_{ds}} = \left(\frac{SK_{pids} + K_{ids}}{s} \right) \left(\frac{1}{R_s + \sigma L_s S} \right) = \frac{K_{ids}}{s} \left(\frac{K_{pids}}{K_{ids}} S + 1 \right) \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + \frac{\sigma L_s S}{R_s}} \quad (\text{III.14})$$

Par compensation de pôle :

$$\frac{K_{pids}}{K_{ids}} = \frac{\sigma L_s}{R_s} \quad (\text{III.15})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte :

$$\frac{i_{ds}}{i^*_{ds}} = \frac{K_{ids}}{R_s s} \quad (\text{III.16})$$

En boucle fermée :

$$\frac{i_{ds}}{i^*_{ds}} = \frac{\frac{K_{isd}}{R_s s}}{1 + \frac{K_{ids}}{R_s s}} = \frac{1}{1 + \frac{R_s - S}{K_{ids}}} = \frac{1}{1 + \tau_{bf} S} \quad (\text{III.17})$$

$$\text{Avec : } \tau_{bf} = \frac{R_s}{K_{ids}} \quad (\text{III.18})$$

L'action intégrale du PI est obtenue comme suite :

$$K_{ids} = \frac{R_s}{\tau_{bf}} \quad (\text{III.19})$$

Donc :

$$\begin{cases} K_{pids} = \frac{3\sigma L_s}{3\tau_{bf}} \\ K_{ids} = \frac{3R_s}{3\tau_{bf}} \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

- **régulateur i_{qs} :**

En procédant de la même manière que pour le régulateur de i_{ds} , on déterminera les coefficients du régulateur de courant i_{qs} qui fournit la tension de référence V_{qs}^* . Le schéma de régulation du courant i_{qs} est représenté sur la figure(III.10).

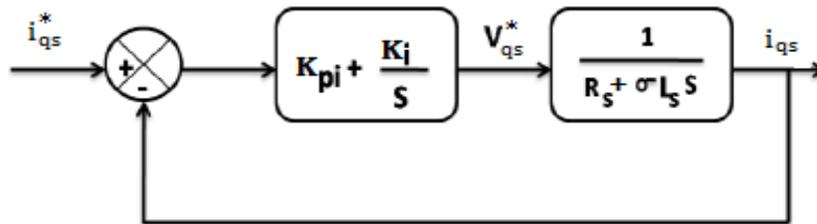


Figure (III.8) : Boucle de régulation du courant i_{qs}

III.6. Défluxage :

Plusieurs applications, plus particulièrement la traction électrique, exigent un fonctionnement en survitesse à puissance constante. Or, pour assurer un tel fonctionnement, dans le cas d'un entraînement à vitesse variable utilisant un moteur asynchrone, une tension élevée à l'entrée est requise. Pour contourner cette demande en tension, on réduit le flux de référence aux vitesses élevées. De plus, pour optimiser la demande du courant de magnétisation de la machine à induction, il est nécessaire de défluxer de manière à offrir à la machine le flux dentelle a besoin pour produire son couple maximal sans aucune violation des contraintes thermique imposées sur la machine et sur les composants de puissances du convertisseur [43].

$$\phi_r = \phi_r N \Omega < \Omega N \quad (\text{III.21})$$

$$\phi_r = \frac{\Omega N}{\Omega_r} \phi_r n \quad \text{si } |\Omega| > \Omega N \quad (\text{III.22})$$

Avec :

Φ_{rN} : Flux rotorique nominal.

Ω_N : vitesse rotorique nominal.

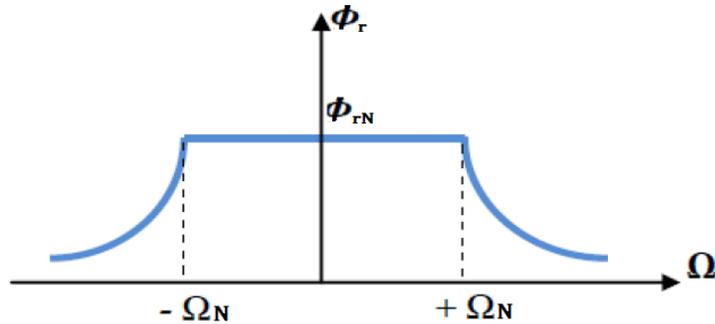


Figure (III.9) : Bloc de défluxage

III.7. Résultats des simulations :

Les simulations présentées dans cette section sont réalisées sur une machine asynchrone triphasée alimentée par un onduleur de tension à MLI vectorielle et pilotée par une commande vectorielle indirecte (CVI).

III.7.1. Résultats de la commande vectorielle indirecte :

- on représente l'évolution de la vitesse On remarque que la vitesse est bien régulée à sa valeur de référence $\Omega_r^*=100$ rad/s
- Dans Les courbe de flux rotoriques ϕ_{idr} ϕ_{iqr} On remarque au régime transitoire, le flux $\phi_{dr}=\phi_{r}$ et $\phi_{qr}=0$, c les conditions de la commande vectorielle
- Dans la figure des courants statoriques I_{ds} et I_{qs} On remarque que le courant I_{ds} est fixé à une valeur constante, par ce que le flux ϕ_{r}^* et constant, alors que i_{qs}^* suit les variations du C_e .

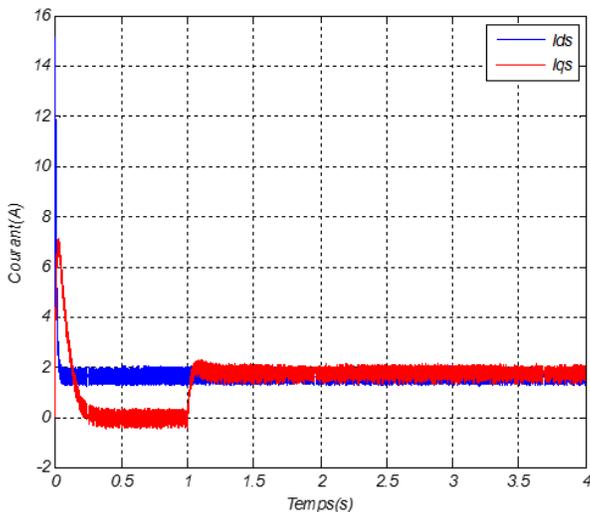


Figure (III.10) : la courbe de courant i_{ds} i_{qs}

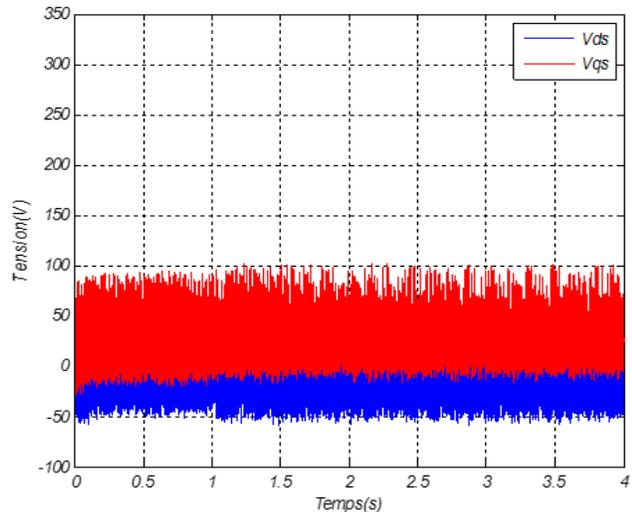


Figure (III.11) : la courbe de tension V_{ds} V_{qs}

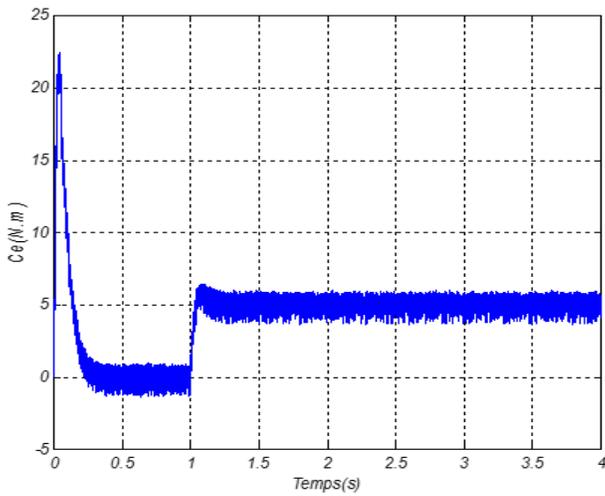


Figure (III.12) : la courbe de couple C_e

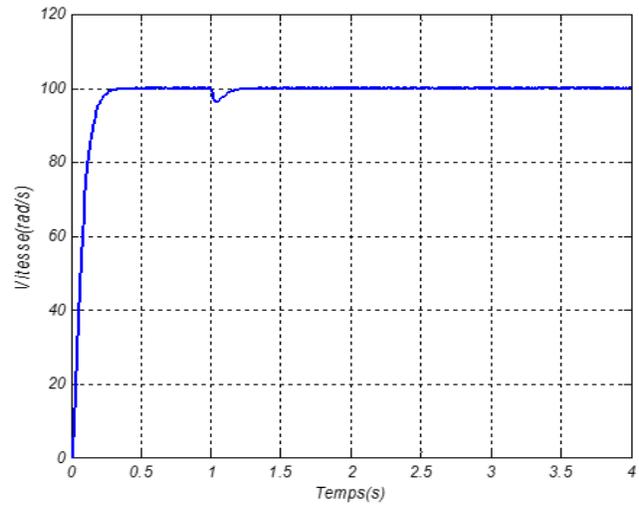


Figure (III.13) : la courbe de vitesse

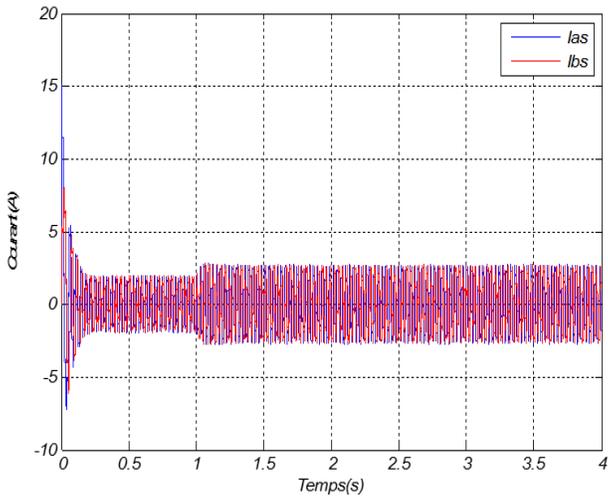


Figure (III.14) : la courbe de courant i_{as} i_{bs}

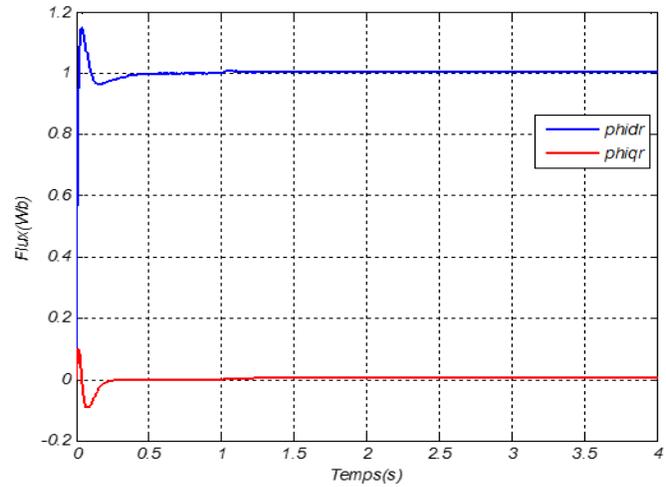


Figure (III.15) : la courbe de flux ϕ_{dr} ϕ_{qr}

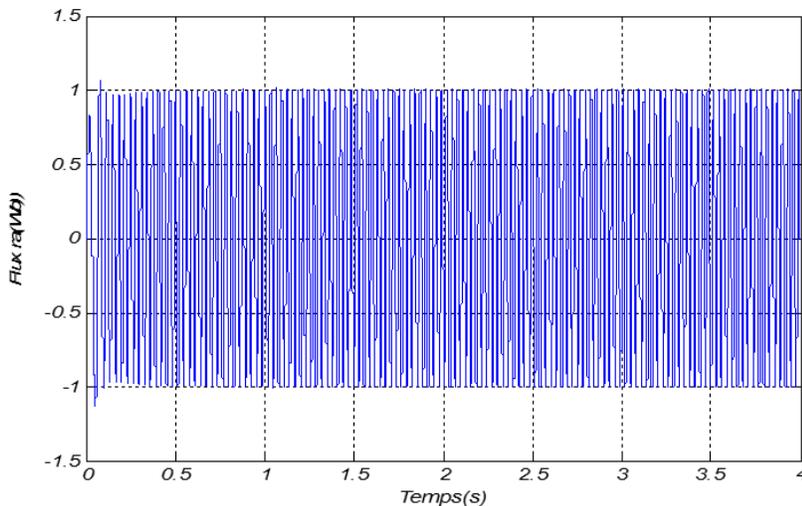


Figure (III.16) : la courbe de flux ϕ_{ra}

III.7.2. Résultats de la commande vectorielle directe :

Afin de vérifier le découplage entre le couple et le flux, nous avons simulé un démarrage à vide pour une vitesse de référence de (100 rad/sec), puis la réponse à un échelon de couple ($C_r=5\text{N.m}$) à l'instant $t=0.8\text{s}$ et un temps de simulation $t=2\text{s}$

Les résultats de simulation sont représentés par les figures suivants :

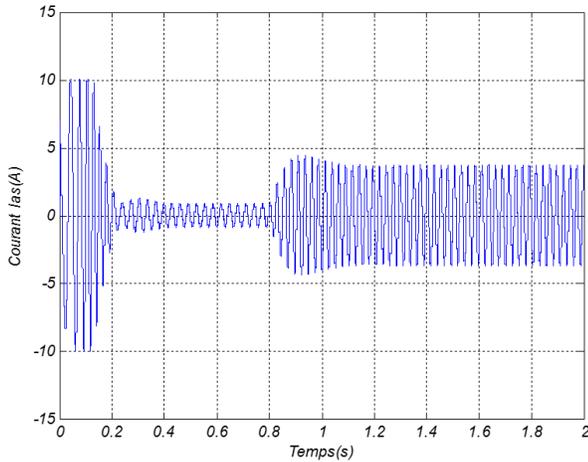
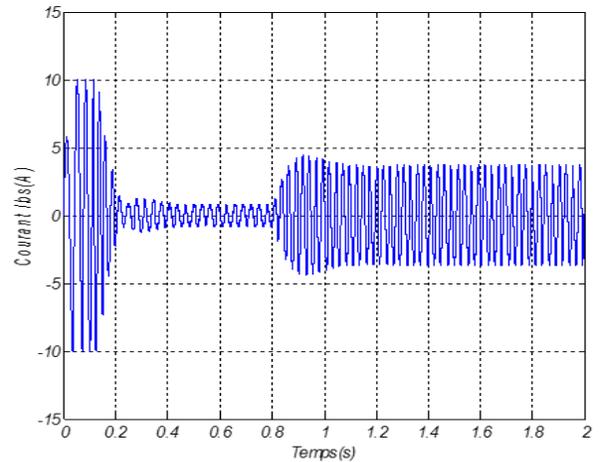


Figure (III.17) : la courbe de courant i_{as}



Figure(III.18) : la courbe de courant i_{bs}

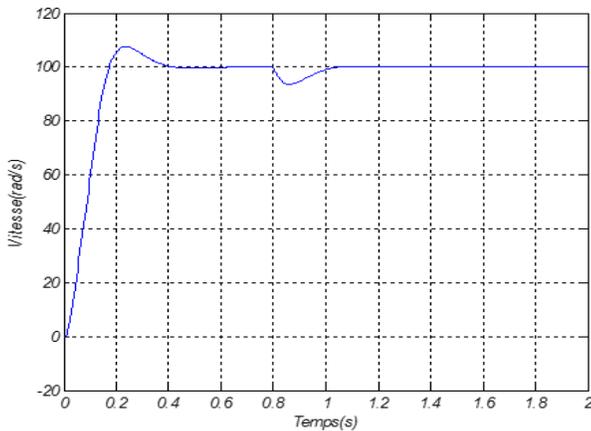


Figure (III.19) : la courbe de vitesse

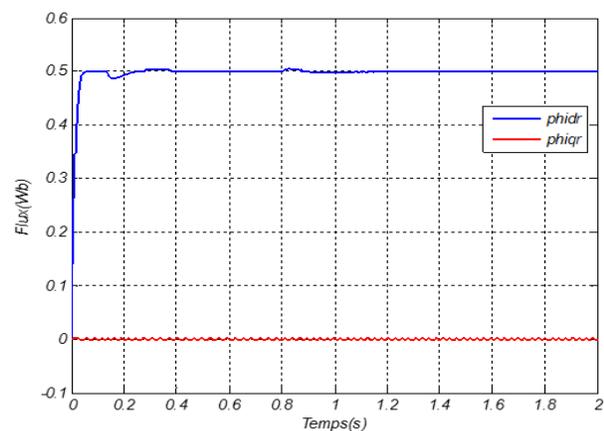


Figure (III.20) : la courbe de flux ϕ_{dr} ϕ_{qr}

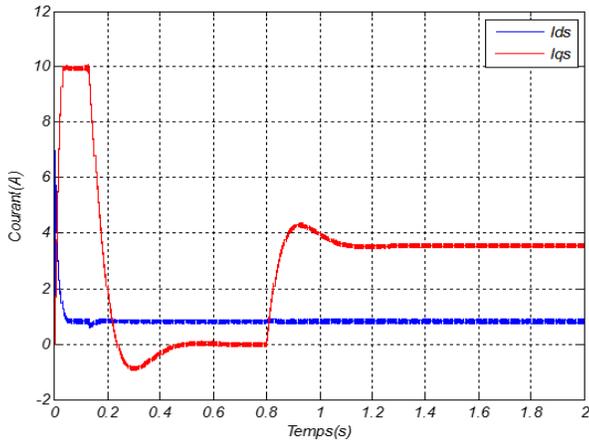


Figure (III.21) : la courbe de courant i_{ds} i_{qs}

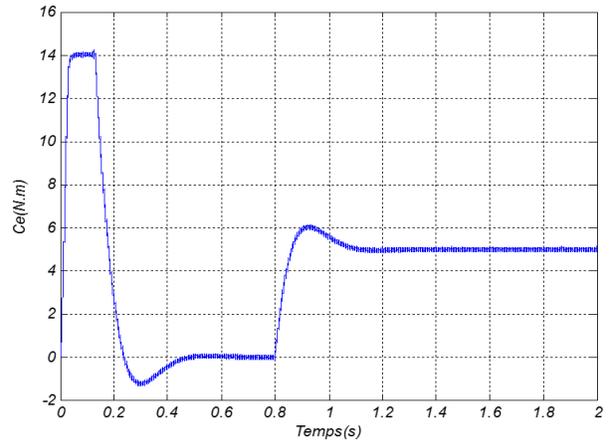


Figure (III.22) : la courbe de couple C_e

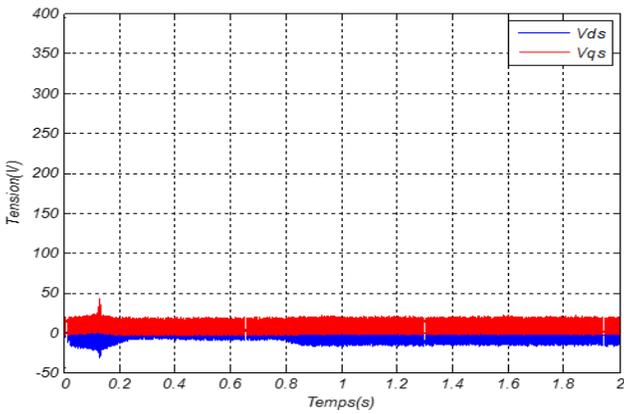


Figure (III.23) : la courbe de courant tension V_{ds} V_{qs}

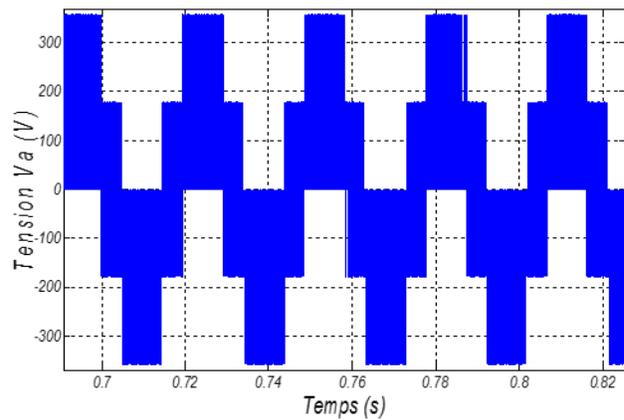


Figure (III.24) : Tension aux bornes de l'onduleur

De ces graphes, on peut déduire :

- L'amplitude du flux est totalement orientée sur l'axe d ($\Phi_{dr}=\Phi_r$; $\Phi_{qr}=0$).
- Le courant i_{ds} reste inchangé lors de la variation du couple de charge.
- Le courant i_{qs} est image du couple électromagnétique.

CHAPITRE III : Commande vectorielle appliqué à la MAS

- **l'inversion du sens de rotation de la commande vectorielle indirecte et directe (CVI CVD):**
les simulations, reportées sur les figures suivant , concernent un échelon de vitesse de 0 à 100 rd/s puis l'application d'un couple de charge de 5 Nm à $t=0.8$ s et enfin l'inversion du sens de rotation à $t=3$ s. Elles sont réalisées sur une machine asynchrone triphasée alimentée par un onduleur de tension

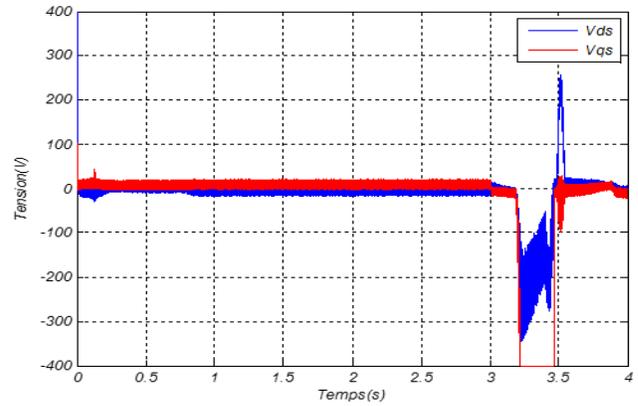
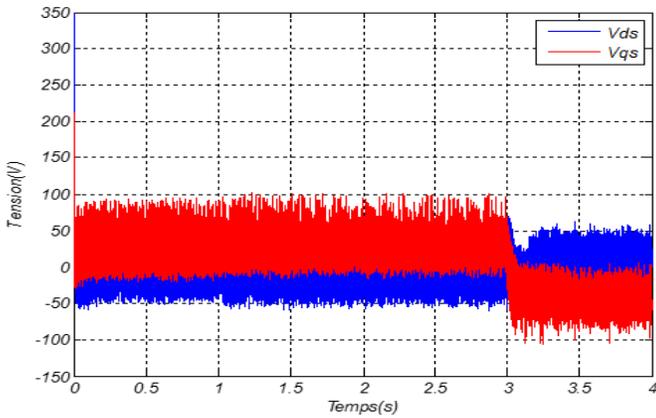


Figure (III.25) : les courbe de tension $V_{ds}V_{qs}$

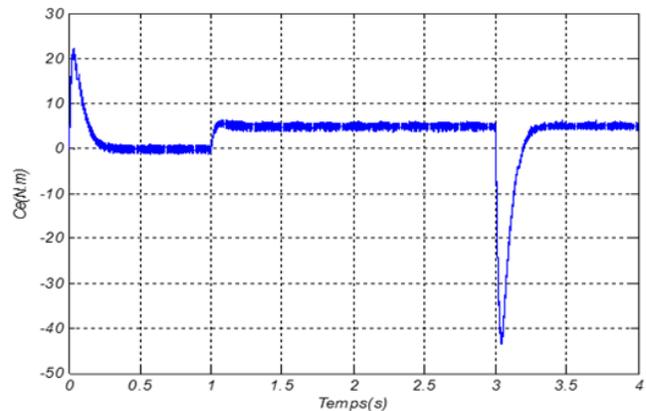
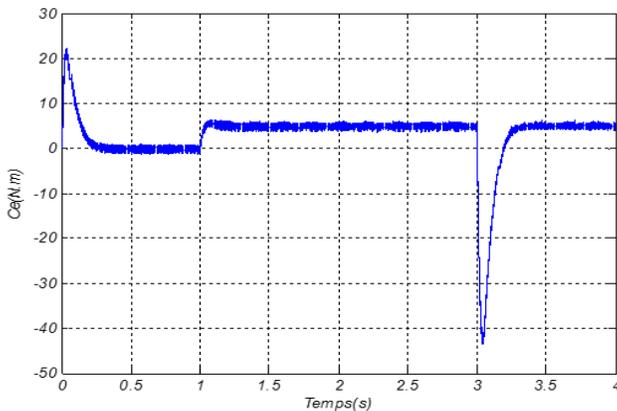


Figure (III.26) : la courbe de couple C_e

CHAPITRE III : Commande vectorielle appliqué à la MAS

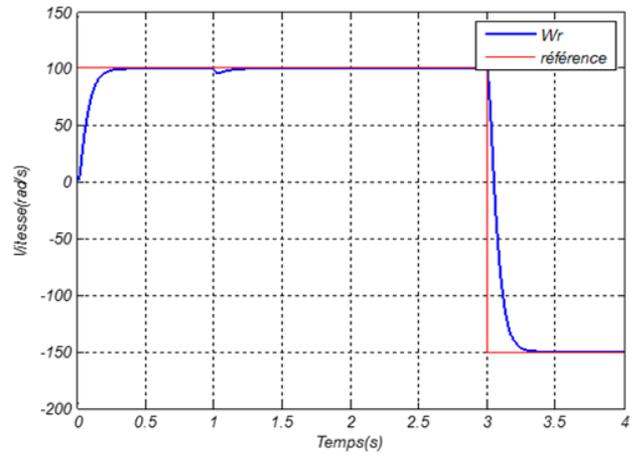
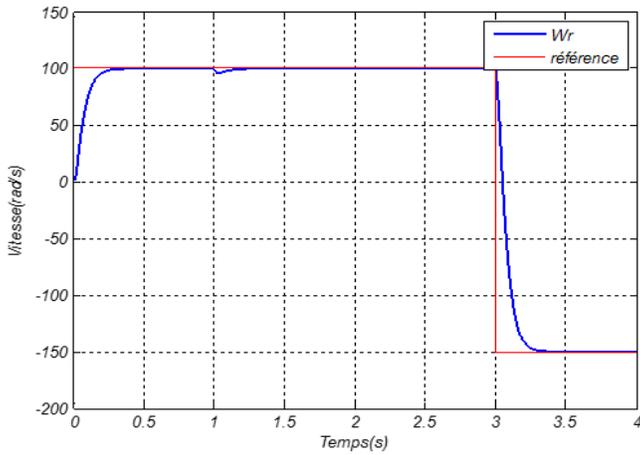


Figure (III.27) : la courbe de vitesse

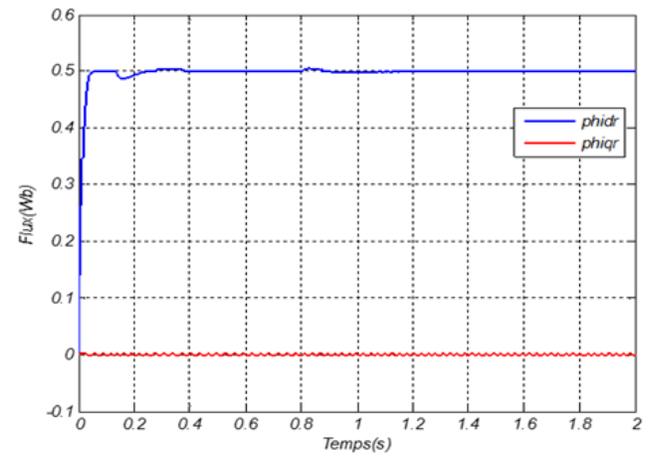
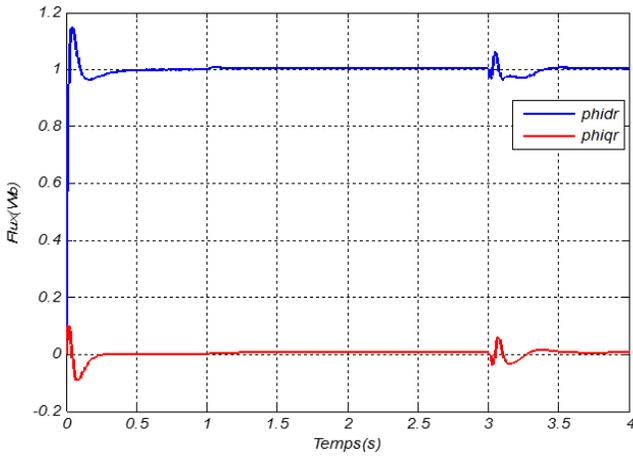


Figure (III.28) : la courbe de flux ϕ_{idr} et ϕ_{iqr}

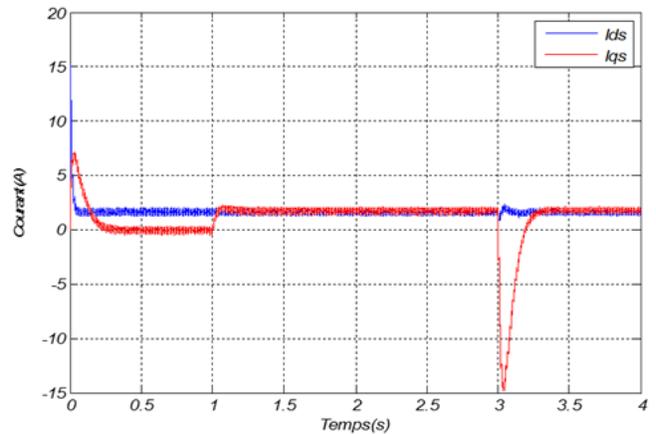
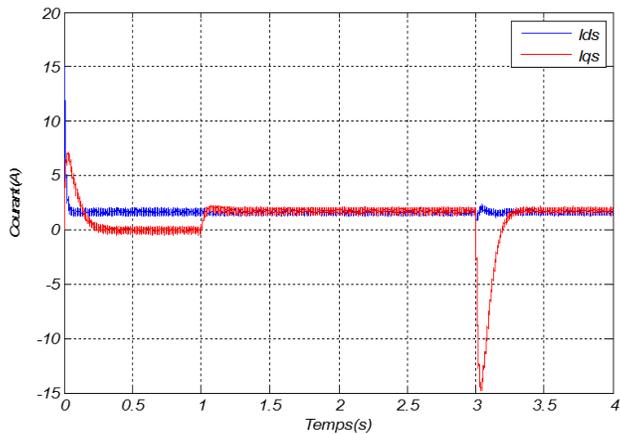


Figure (III.29) : la courbe de courant i_{ds} i_{qs}

III.8. Discussion des résultats :

Les essais de simulation effectués pour la CVI sont gardés les mêmes que pour la CVD. En régime permanent, on remarque que les résultats de simulation sont analogues.

- Pour la commande vectorielle directe :

Nous avons obtenu des résultats presque satisfaisants qui appliquaient le principe dont nous avons discuté précédemment et il est atteint

Pour le courant i_{qs} il suit le couple C_e en forme, quant au courant i_{ds} il est stable dans une valeur dans le régime permanent

La vitesse est stable aussi au régime permanent

Les tension V_{ds} et V_{qs} constant sur tout la période de la simulation

- Pour la commande vectorielle indirecte :

On changé le sens de rotation enter 100rad/s nous avons obtenu presque les mémés résultats de la commande vectoriel directe avec quelques différences (différence au couple électromagnétique , le courant i_{ds} et i_{qs} et V_{qs} V_{ds})

III.9. Robustesse vis à vis des variations paramétriques :

Dans cette partie, nous a changé Inductance mutuel (L_m), Inductance cyclique du rotor (L_r) et le moment d'inertie du rotor (j) (la nouvel $j=j*2$, $L_m=L_m*2$, $L_r=L_r*2$)

III.10. Résultats de simulation :

Nous avons changé Inductance mutuel (L_m), Inductance cyclique du rotor (L_r) et le moment d'inertie du rotor (j) pour voir leur effet sur la commande vectorielle directe et la commande vectorielle indirecte

III.10.1. Résultats de la commande vectorielle directe :

- la modification de (L_m L_r) les résultat sur les figures suivant :

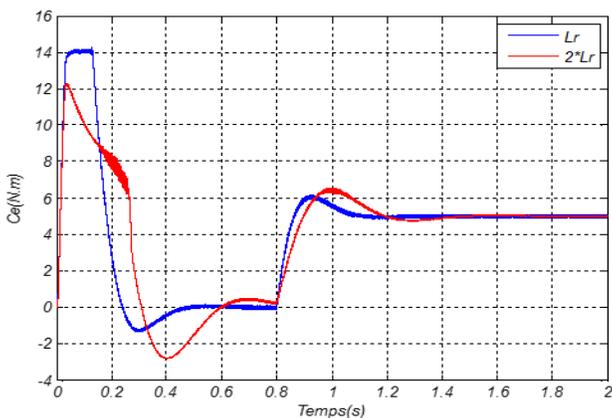


Figure (III.30) : la courbe de couple C_e

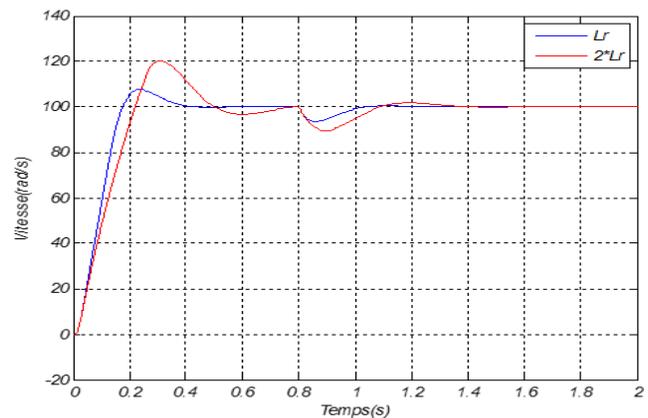


Figure (III.31) : la courbe de vitesse

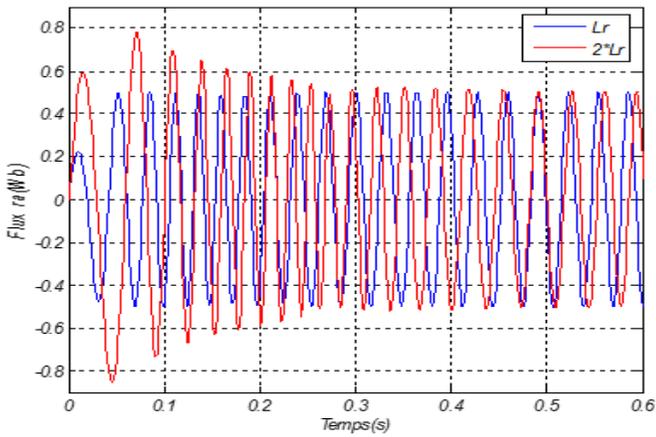


Figure (III.32) : la courbe de flux

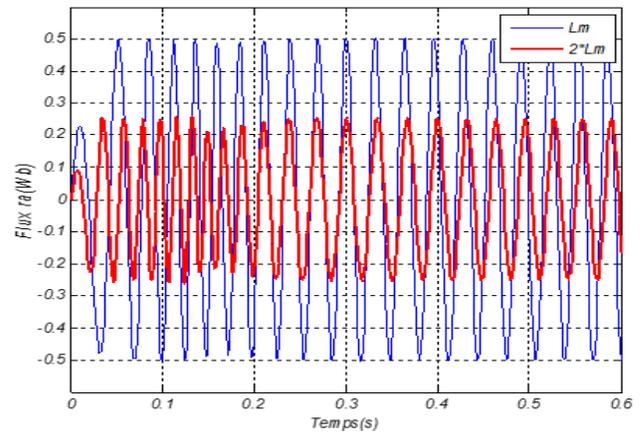


Figure (III.33) : la courbe de flux

- La modification de moment d'inertie du rotor (j) :

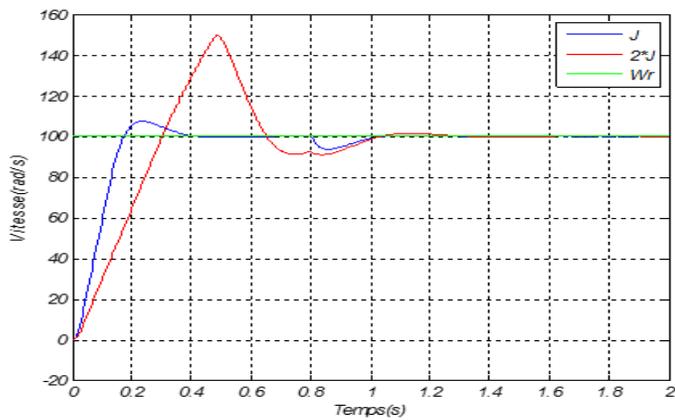


Figure (III.34) : la courbe de vitesse

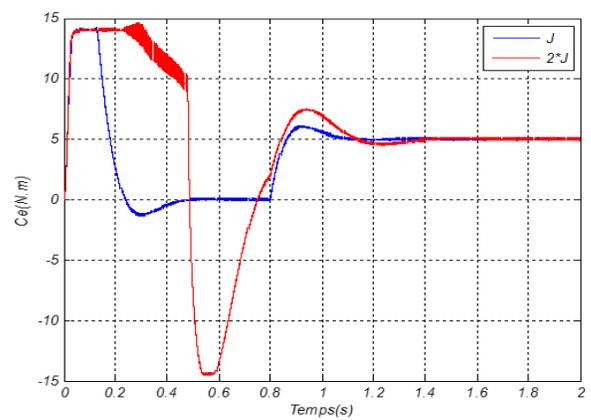


Figure (III.35) : la courbe de couple C_e

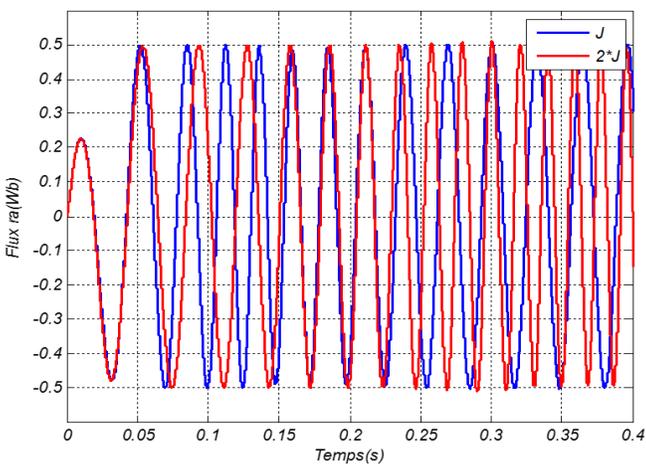


Figure (III.36) : la courbe de flux ra

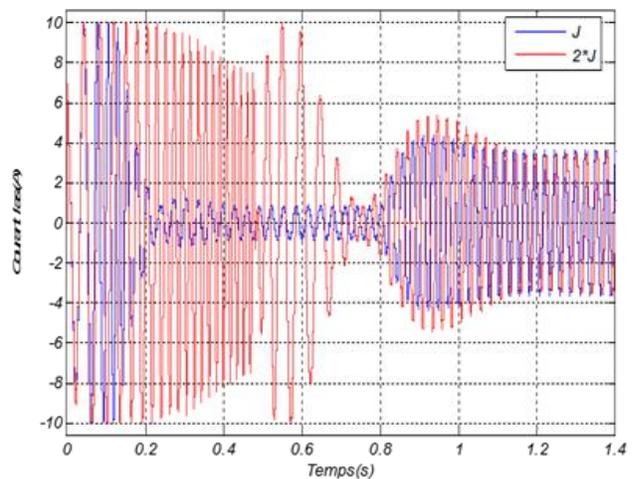


Figure (III.37) : la courbe de courant

III.10.2. Résultats de la commande vectorielle indirecte :

- La modification de moment d'inertie du rotor (j) :

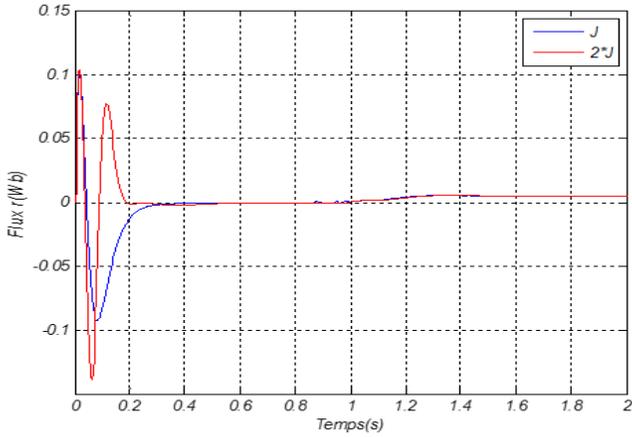


Figure (III.38) : la courbe de flux

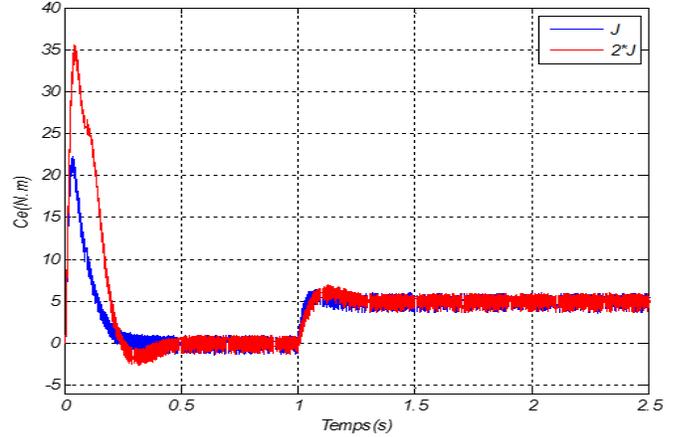


Figure (III.39) : la courbe de couple C_e

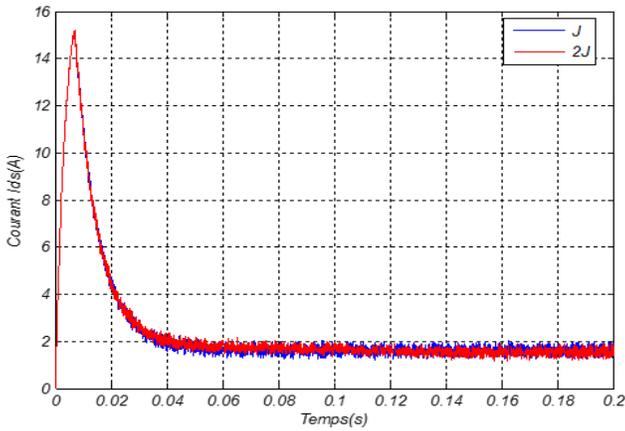


Figure (III.40) : la courbe de courant i_{ds}

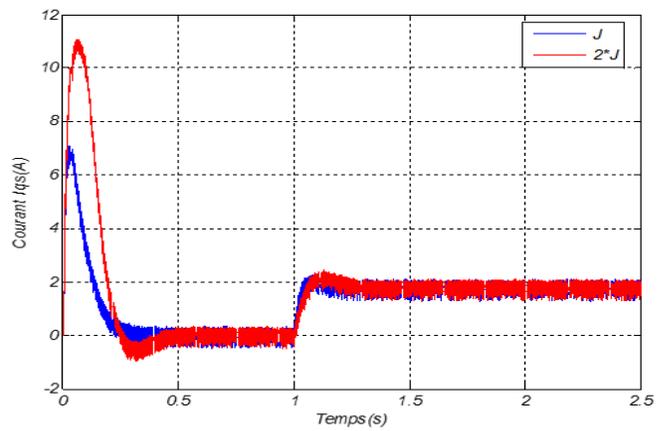


Figure (III.41) : la courbe de courant i_{qs}

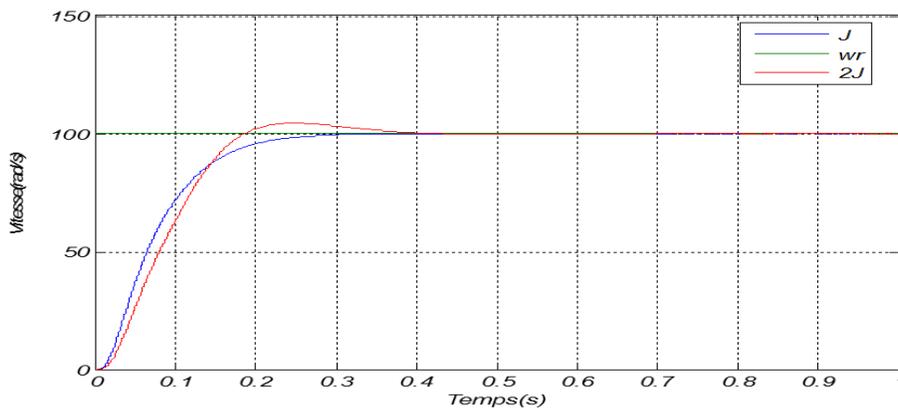


Figure (III.42) : la courbe de vitesse

- la modification de ($L_m L_r$):

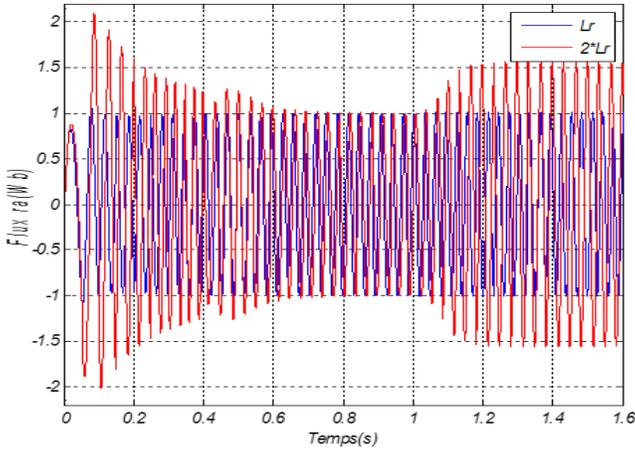


Figure (III.43) : la courbe de flux ra

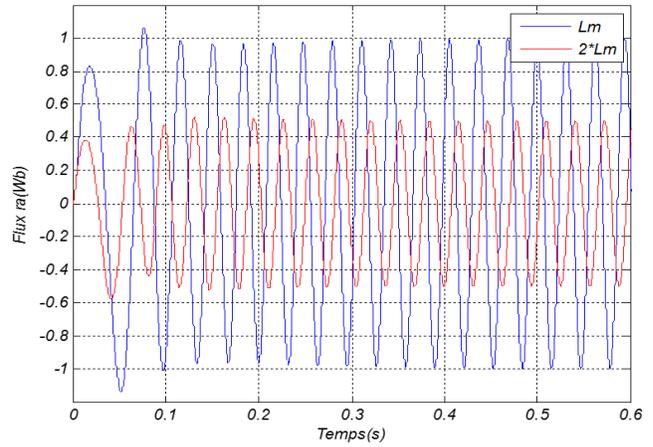


Figure (III.44) : la courbe de flux ra

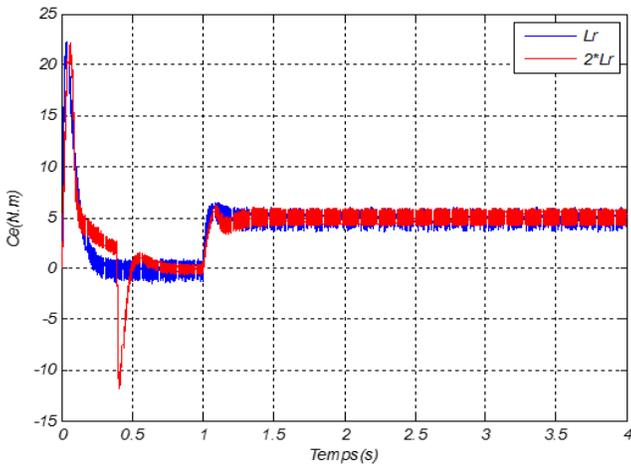


Figure (III.45) : la courbe de couple C_e

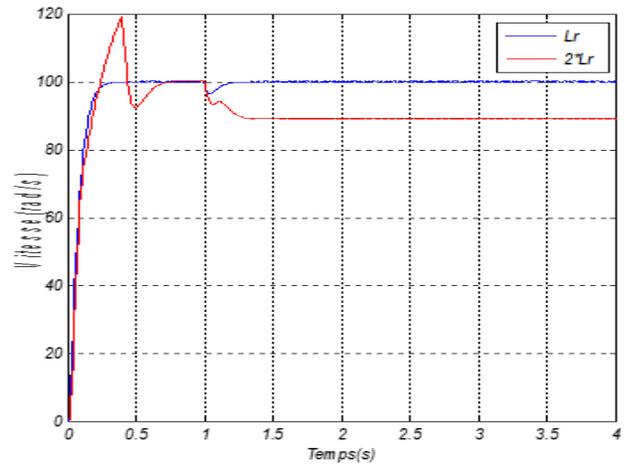


Figure (III.46) : la courbe de vitesse

III.11. Comparaison entre la commande vectorielle directe et la commande vectorielle indirecte :

Les simulations, reportées sur les figures concernent un échelon de vitesse de -150/100 rd/s puis et l'application d'un couple de charge de 5 N.m à $t=0.8$ s

Au début des années 1970, BLASCHKE a créé la théorie du contrôle vectoriel qui sous-tend cette technologie. Il s'agit de guider le vecteur de flux de manière à faire ressembler cette machine à une machine à courant continu à excitation distincte du point de vue de la commande. Les régulations d'action proportionnelle, intégrale et dérivée utilisées dans ce contrôle sont des régulateurs traditionnels [44].

CHAPITRE III : Commande vectorielle appliqué à la MAS

En fait, comme nous l'avons vu, la commande directe est la plus facile à utiliser, alors qu'elle n'est pas la plus efficace. Par contre, la voie indirecte permet de construire un système peu efficace grâce au bouclage en cascade. Il est sans aucun doute plus difficile à exécuter que le contrôle direct, mais en réduisant les problèmes causés par les changements paramétriques, il permettra au système de production électrique de fonctionner au mieux.

III.12. Conclusion :

D'après les résultats précédents, on peut conclure que la commande vectorielle par orientation du flux rotorique (directe et indirecte) est performante et nous permet de faire fonctionner la machine asynchrone avec de bonnes performances dynamiques et statiques.

Autrement dit, la commande vectorielle permet d'imposer à la machine asynchrone des comportements semblables à ceux de la machine à courant continu dans laquelle le flux n'est pas affecté par les variations du couple électromagnétique.

Cependant, l'inconvénient majeur de cette commande (particulièrement la CVI) est sa faible robustesse vis-à-vis des variations paramétriques, en particulier de la variation avec la température et la saturation de la résistance rotorique qui intervient dans la définition de.

En suit Nous avons présenté Le contrôle vectoriel direct nécessite la connaissance du flux réel pour pouvoir effectuer sa régulation, tandis que le contrôle indirect ne tient pas en considération ce flux et fait quelles approximations. Aussi nous avons également remarqué l'effet des variations paramétriques sur la commande CVI et CVD

COCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

Ce travail a été consacré à l'étude de la commande vectorielle de la machine synchrone alimentée par un onduleur, La modélisation de la machine synchrone à rotor bobinée nous ont permis de mettre en évidence le fort couplage existant entre les variables internes de cette machine.

Avant d'aborder cette étude, nous avons commencé par présenter le modèle de la machine et son alimentation. La modélisation de la machine asynchrone est basée sur la transformation de Park, ce qui permet de simplifier les équations de la machine électrique, les résultats obtenus montrent bien la validité du modèle de Park pour la détermination des différentes caractéristiques de la machine.

Dans cette travail, nous avons présenté une généralité sur les machines électriques, et les avantages et les inconvénients ainsi que

A travers ce travail nous avons fait plusieurs constats dont les plus importants sont :

- La commande vectorielle a permis de remédier aux faiblesses de la commande scalaire, elle présente des performances dynamiques et statiques élevées ; mais elle présente l'inconvénient d'être affecté par les variations paramétriques deus à la température et la saturation des circuits magnétiques
- A cet effet, les principes de la commande vectorielle avec orientation du flux rotorique ont été résumés, avec un calcul des différents gains des régulateurs (PI) utilisés dans la commande.
- les résultats de simulation montrent bien le découplage entre le couple et le flux. dans les différents commande CVI CVD

PARAMETRES DE LA MACHINE ASYNCHRONE UTILISEE :

PARAMETRES DE LA MACHINE ASYNCHRONE UTILISEE :

Les caractéristiques principales de la machine utilisée sont :

Tension nominale	220/380V
Nombre de pair de pole	2
La vitesse de rotation	1500tr/min

Paramètres électriques :

Résistance statorique	10 Ω
Résistance rotorique	6.3 Ω
Inductance cyclique du stator	0.6560 H
Inductance cyclique du rotor	0.6530 H
Inductance mutuel	0.613 H

Paramètres mécaniques :

Moment d'inertie du rotor	0.02 Kg.m ²
---------------------------	------------------------

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [2] HASSENI Mohamed Nacer-eddine « Commande Directe du Couple d'une Machine Asynchrone » Mémoire de master, Université de Biskra Algérie, 2019.
- [3] Production décentralisée de l'énergie électrique : Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée par la mrilouze
- [4] AZZOUZI KHELED, « Modélisation d'un moteur asynchrone pour le suivi de la sévérité des défauts rotoriques par l'approche de la fonction d'enroulement » ,Mémoire de magister, université Mohamed Boudiaf Oran, soutenue le 11/04/2011
- [5] T. Benmiloud, "Commande du Moteur Asynchrone avec Compensation des Effets des Variations Paramétriques", Thèse de doctorat, Université des Sciences et la Technologie d'Oran, Algérie, 2012.
- [6] HAMADI SAFI ALLAH <<Commande par Retour D'état Linéarisant D'une Machine Asynchrone Avec Et Sans Défaut >> Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-M'sila,2015/2016.
- [8] Dr. Mounir HADEF, "Commande Electrique", Cours, Université de Jijel 2015.
- [9] Tamrabet Hanene" Robustesse d'un Control Vectoriel de Structure Minimal d'une Machine Asynchrone " Thèse de magistère, Batna, 20.05.2006.
- [10] Dissa Abdennour,"Contrôle direct du couple du moteur à induction sans capteur de vitesse associée à un observateur non linéaire ", thèse de magister, Université de Batna.
- [11] Guy Strutzer, Eddie Samigil, "Modélisation et Commande des Moteurs Triphasés. Commande vectorielle des moteurs synchrones, commande numérique par contrôleurs".
- [12] Adel M. « Commande non linéaire à modèle prédictif pour une machine asynchrone », thèse doctorat, université du Québec, Mai 2007.
- [13] Monsef Karim TIBERMACHINE « Commande vectorielle d'une machine asynchrone » Mémoire de master, Université de Biskra Algérie, 2019.
- [14] K. Yahia, "Estimation en ligne de l'état et des paramètres du moteur asynchrone triphasé", Mémoire de magister, Université de Biskra, Algérie, 2005.

BIBLIOGRAPHIE

- [15] CHADD khayra , AMIROUCHE Kelthoum « Modélisation et commande des machines synchrones à inducteur » Mémoire de master, Université de d'ADRAR Algérie, 2017.
- [16] GUEHAIZ Mohamed Al amine « Diagnostic de défaut de barres cassées dans la machine asynchrone à cage par l'utilisation de la transformation en ondelette. » Mémoire de master, Université de Biskra Algérie, 2019.
- [18] Radouane BOUSSEKSOU « Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic » Mémoire de magister, Université Mentouri Constantine 2007
- [19] Akkouchi Kamel, " Commande directe du couple (DTC) d'une machine asynchrone ", Thèse de magister, Université Annaba 2007.
- [20] <https://fr.demotor.net/moteurs-electriques/moteurs-ac/moteur-asynchrone/rotor-de-cage-d-ecureuil> , 29/04/2022 15:29 PM
- [21] Tidjani Abd el jaouad , Al Amoudi Badreddine «Identification paramétrique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil par la technique «optimisation d'essaim de particules» »Mémoire Master Académique , Université Kasdi Merbah Ouargla 2016
- [23] GUY SEGUIER, FRANCIS LABRIQUE Les convertisseurs de l'électronique de puissance, volume 4,La conversion continu-alternatif. Technique et documentation Lavoisier 1989.
- [24] H. Boukhalifa, R. Sid, "Commande directe du couple (DTC) d'un moteur asynchrone", Mémoire de master, Université de Ouargla, Algérie, 2015.
- [26] N. BESSOUS. Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones, Thèse de magister, Université de Constantine.
- [27] A. BENSEGHIR et S. AMIRI, « Commande prédictive d'une machine asynchrone », mémoire d'ingénieur, Université de M'sila, Juillet 2004.
- [30] S. Chaouch, « Commande vectorielle robuste d'une machine à induction sans capteur de vitesse» Thèse de doctorat, Université Batna, Décembre 2005.
- [31] G. Brahim, " Commande non linéaire de la machine à induction ", Thèse de master, Université deBatna,2012.

BIBLIOGRAPHIE

- [32] LEILA BENALIA, « Commande en tension des moteur a induction double alimentes » Thèse de doctorat ,Université de Batna,2010.
- [33] CHAIBDDRA DJOUDI, ABDE LLAOUI TAWFIK « Commande vectorielle d'un moteur synchrone à rotor bobiné » mémoire master Université de Biskra 2020
- [34] Bayala Bapio (FORMATION CONTINUE) « cour machine électrique » Edition revue 2010
- [35] M. BAZI Smail,« Contribution à la Commande Robuste d'une Machine Asynchrone par la Technique PSO » Particule Swarm Optimization » Thèse de Magister ,Université de Batna,2009.
- [36] ADEL MERABET « Commande non linéaire à modèle prédictif pour une machine Asynchrone » Thèse de Doctorat, Université du Québec - Chicoutimi, Mai 2007.
- [37] HAMZA ADDAD <<Commande Vectorielle sans Capteur de Vitesse de la Machine Asynchrone>> Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi, 2015.
- [39] TLIBA Yazid , NETTARI Faouzi « Commande Vectorielle d'un Moteur Asynchrone alimenté en Courant et en Tension »Mémoire de Master, Université el Oued 2020
- [40], BERREHAIL Belkacem, "Identification des paramètres d'un moteur asynchrone a cage", mémoire de magistère, université de Batna, 2013
- [41] RABIA Lakhdar, Modélisation, identification expérimentale et commande vectorielle d'un moteur asynchrone triphasé à cage", mémoire de master, université de Ouargla, 2015
- [42] Lotfi BAGHLI, « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de l'alogique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques » Thèse de doctorat ,14Janvier 1999.
- [43] TARBOUCHI Mohamed, « Commande par linéarisation exacte d'une machine asynchrone, Régime défluxé » Thèse présentée pour l'obtention du grade de (P.Hd) à l'université de Laval . Québec – 1997
- [44] Mohamed A. et al.,« Etude comparative entre la commande vectorielle directe et indirecte de la Machine Asynchrone à Double Alimentation(MADA) dédiée à une application éolienne » Journal of Advanced Research in Science and Technology, 2014, 1(2), 88-100.
- [45] Merzoug M.S, « Etude comparative des performances d'un DTC et d'un FOC d'une Machine synchrone à aimants permanents (MSAP) » .Thèse de Magister, université de Batna2008.

BIBLIOGRAPHIE
